

Schaarschmidt, René

Experimentelle Schwingungsmessung an
verschiedenen Bewegungssystemen von
Lasermaschinen unter Nutzung von
3D-Beschleunigungssensoren

eingereicht als

BACHELORARBEIT

an der

HOCHSCHULE MITTWEIDA (FH)

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fachbereich Maschinenbau/Feinwerktechnik

Mittweida, 2010

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Martin Zimmermann

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Thomas Kimme

vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am:

Bibliographische Beschreibung:

Schaarschmidt, René:

Experimentelle Schwingungsmessung an verschiedenen Bewegungssystemen von Lasermaschinen unter Nutzung von 3D-Beschleunigungssensoren. - 2010. - 52 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Maschinenbau, Bachelorarbeit, 2010

Referat:

Ziel der Bachelorarbeit ist es, experimentelle Schwingungsmessungen an den Bewegungssystemen von Lasermaschinen durchzuführen. Die Hauptaufgabe besteht darin, Beschleunigungswerte mittels 3D-Beschleunigungssensoren aufzunehmen, um anschließend Amplituden und Geschwindigkeiten der Schwingungen zu ermitteln. Anhand der Ergebnisse sollen die Bewegungssysteme miteinander verglichen werden. Zusätzlich wird der Versuch unternommen die gemessenen Amplituden eines Bewegungssystems durch Rechnung nachzuvollziehen.

Inhaltsverzeichnis

	Formelverzeichnis	V
	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	VII
1	Einleitung	1
2	Anforderungen Bachelorprojekt	2
3	Grundlagen	3
	3.1 Schwingungen	3
	3.2 Schwingungsmessung	4
	3.3 Messaufbau	5
	3.4 Prinzip der verwendeten Beschleunigungssensoren	7
	3.5 Ermittlung der Amplituden und Geschwindigkeiten aus den Beschleunigungswerten	8
	3.6 Berechnung Umrechnungsfaktor	10
	3.7 Ursachen von Messfehlern	11
4	Schwingtest	12
	4.1 Ersatzmodell	12
	4.2 Theoretische und gemessene Beschleunigungswerte	13
5	LVM 700	16
	5.1 Maschinenvorstellung	16
	5.2 Vorgenommene Messungen	17
	5.3 Ergebnisse	18
6	LVM 316	23
	6.1 Maschinenvorstellung	23
	6.2 Vorgenommene Messungen	24
	6.3 Ergebnisse	25
7	Vormer 2	29
	7.1 Maschinenvorstellung	29
	7.2 Vorgenommene Messungen	30
	7.3 Ergebnisse	31
	7.4 Rechnerische Ermittlung der Schwingamplitude	36
	7.4.1 Nachgiebigkeit der Spindel	36

7.4.2	Nachgiebigkeit der Lagereinheit	37
7.4.3	Maximale Einfederung	39
7.4.4	Verkipppweg direkt an den Linearführungselementen	41
7.4.5	Einfluss der Verkipfung	44
7.4.6	Nachgiebigkeit des Auslegers	46
7.4.7	Auslenkung der Kupplung	47
7.4.8	Anteilige Auslenkungen zur Gesamtamplitude	48
8	Vergleich der Maschinen	49
8.1	Gegenüberstellung der Maschinen	49
8.2	Möglichkeiten um Schwingungen zu dezimieren	50
9	Zusammenfassung	52
10	Anlagen	53
11	Quellenverzeichnis	57
12	Selbstständigkeitserklärung	58

Formelverzeichnis

Formelzeichen	Größe	Einheit
A	Fläche	mm ²
a	Beschleunigung	m/s ²
C	elektrische Kapazität	F
c	Federsteifigkeit	N/mm
c _{BK30/20}	Federsteifigkeit Lager BK30/ BK20	N/μm
d	Durchmesser	mm
d _c	Abstand der Platten	mm
d _{x/z}	Abstand Sensor zu Drehpunkt in X/Z	mm
E	Elastizitätsmodul	N/mm ²
F	Kraft	N
F _{A/B}	Auflagerkraft in A/B	N
F _{AX1/X2/Y}	Teilauflegerkraft bei X/Y -Bewegung	N
F _{beschl}	Beschleunigungskraft	N
F _D	Federkraft	N
F _{gz}	Schwerkraft Zusatzkörper	N
F _{X/Y/Z}	Kraft in X/Y/Z	N
F _{X1/X2}	Teilkraft in X	N
g	Fallbeschleunigung (9,81m/s ²)	m/s ²
I	Flächenträgheitsmoment	mm ⁴
K	Umrechnungsfaktor	V/g
l	Länge	mm
l ₀	Anfangslänge	mm
m	Masse gesamt	kg
m _F	Masse Biegestab	kg
m _S	Masse Sensor	kg
m _{SK}	Masse Stahlklotz	kg
m _{x/y/z}	bewegte Masse in X/Y/Z	kg

m_{zu}	Masse Zusatzkörper	kg
$q_{X/Y/Z}$	Verschiebung in X/Y/Z	μm
$r_{X/Y/Z}$	Abstand zwischen Führungswagen in X/Y/Z	mm
S	Umrechnungsfaktor	$\text{m}/(\text{s}^2 \cdot \text{V})$
s	Amplitude	mm
$s_{X/Y/Z}$	Länge idealisierter Ausleger bei X/Y/Z- Bewegung	mm
$s_{X1/X2}$	Teillänge idealisierter Ausleger bei X- Bewegung	mm
t	Zeit	s
$u_{X/Y/Z}$	Verkipppweg an Linearführung bei X/Y/Z- Bewegung	μm
v	Geschwindigkeit	m/s
x	Auslenkung	mm
x_{\max}	max. Auslenkung	mm
x_1/z_1	Verkipppweg Referenzsensor bei X/Z- Bewegung	μm
x_2/z_2	Verkipppweg Optik bei X/Z- Bewegung	μm
α	Verkippwinkel	°
$\Delta l_{x/y/z}$	Längenänderung in X/Y/Z	μm
ΔU_S	elektr. Spannungsbereich Sensor	V
ΔU_{MV}	elektr. Spannungsbereich Messverstärker	V
ε	Dehnung	%
ε_r	Dielektrizitätszahl	
ε_0	elektrische Feldkonstante	As/Vm
σ	Spannung	N/mm ²
$\delta_{X/Y/Z}$	Einfederung Linearführung bei X/Y/Z- Bewegung	μm
$\delta_{X1/X2}$	Teileinfederung Linearführung bei X- Bewegung	μm

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung

1	Klassifizierung von Schwingungen.....	3
2	Piezoelektrischer Sensor.....	4
3	Messsystem.....	6
4	Sensorplatine.....	7
5	kapazitiver Beschleunigungssensor.....	7
6	Ausschnitt aus CSV-Datei.....	9
7	Beschleunigungsdatenverlauf einer Messung.....	9
8	Schwingtest als Feder-Masse-System.....	12
9	Beschleunigungs-, Geschwindigkeits- und Amplitudenverlauf der 1.Schwingung nach Kappen des Fadens der Datei S1_y.csv.....	14
10	Bewegungssystem LVM 700.....	16
11	gemessene Schwingamplituden im Bewegungssystem.....	17
12	Beschleunigungsverlauf der 1.Schwingung im Umkehrpunkt aus der Datei 700_3z.csv.....	20
13	Geschwindigkeitsverlauf der 1.Schwingung im Umkehrpunkt aus der Datei 700_3z.csv.....	21
14	Amplitudenverlauf der 1.Schwingung im Umkehrpunkt aus der Datei 700_3z.csv.....	21
15	Bewegungssystem LVM 316.....	23
16	gemessene Schwingamplituden im Bewegungssystem.....	24
17	Beschleunigungsverlauf der 1.Schwingung im Umkehrpunkt aus der Datei 1x.csv.....	27
18	Geschwindigkeitsverlauf der 1.Schwingung im Umkehrpunkt aus der Datei 1x.csv.....	27
19	Amplitudenverlauf der 1.Schwingung im Umkehrpunkt aus der Datei 1x.csv.....	28
20	Bewegungssystem Vormer 2.....	29
21	gemessene Schwingamplituden im Bewegungssystem.....	30
22	Beschleunigungsverlauf der 1.Schwingung im Umkehrpunkt aus der Datei Vormer_2x.csv.....	33

23	Geschwindigkeitsverlauf der 1.Schwingung im Umkehrpunkt aus der Datei Vormer_2x.csv.....	34
24	Amplitudenverlauf der 1.Schwingung im Umkehrpunkt aus der Datei Vormer_2x.csv.....	34
25	Kräfte am idealisierten Ausleger.....	39
26	Ermittlung Verkippweg an der Linearführung mittels Strahlensatz.....	41
27	Verkippung des idealen und unendlich steifen Auslegers.....	44
28	Verschiebung des Auslegers durch Krafteinwirkung in X- Richtung.....	46
29	Verschiebung des Auslegers durch Krafteinwirkung in Z -Richtung.....	46

Tabelle

1	max. Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Amplituden des Schwingtests.....	15
2	Gegenüberstellung errechneter und gemessener Beschleunigungen des Schwingtests.....	15
3	max. Beschleunigungen der einzelnen Messungen an der LVM 700.....	20
4	max. Geschwindigkeiten der einzelnen Messungen an der LVM 700.....	20
5	max. Amplituden der einzelnen Messungen an der LVM 700.....	21
6	max. Beschleunigungen der einzelnen Messungen an der LVM 316.....	26
7	max. Geschwindigkeiten der einzelnen Messungen an der LVM 316.....	27
8	max. Amplituden der einzelnen Messungen an der LVM 316.....	28
9	max. Beschleunigungen der einzelnen Messungen am Vormer 2.....	33
10	max. Geschwindigkeiten der einzelnen Messungen am Vormer 2.....	33
11	max. Amplituden der einzelnen Messungen am Vormer 2.....	34
12	Gegenüberstellung errechneter und gemessener Auslenkungen an den Linearführungen.....	38
13	gemessene Verkippung der Achsen in Abhängigkeit der Bewegungsrichtung.....	42
14	Gegenüberstellung errechneter und gemessenen Einfederungen der jeweiligen Achse.....	43
15	gemessene Amplitudenwerte der Kupplung.....	47
16	Auflistung der anteiligen errechneten Auslenkungen zur Gesamtamplitude.....	48

1 Einleitung

Moderne Lasermaschinen fordern heutzutage hohe Prozessgeschwindigkeiten bei hoher Bahnpräzision. Zudem werden die Brennflecke klein gehalten, um hohe Leistungsdichten des Laserstrahls zu erreichen. Schon kleine Abweichungen von der Bahn stellen dann ein riesiges Fehlerpotenzial dar. Schwingungen im Bewegungssystem führen deshalb oft zu Komplikationen während des Bearbeitungsprozesses und müssen gering gehalten werden. Es ist also äußerst wichtig, sie zu erfassen und deren Auswirkungen abzuschätzen, um gegebenenfalls Verbesserungen herbeizuführen. Aufgrund dessen wird eine experimentelle Schwingungsmessung an einigen Lasermaschinen der Firma Laservorm GmbH Altmittweida durchgeführt. Die Messobjekte bilden dabei die Bewegungssysteme neuer und älterer Lasermaschinen. Eine solche Schwingungsmessung wird erstmals innerhalb der Firma durchgeführt und soll als Grundlage für zukünftige Messungen dienen. Die Messwerterfassung wird in den Richtungen der Achsen X, Y und Z der Bewegungssysteme, mithilfe von 3D-Beschleunigungssensoren und computerunterstützten Datenerfassungseinheiten erfolgen. Aus den gesammelten Beschleunigungswerte können anschließend auch Geschwindigkeiten und Amplituden ermittelt werden. Die gewonnenen Daten lassen Rückschlüsse ziehen, inwieweit beispielsweise die Prozessanforderungen erfüllt werden bzw. welche Möglichkeiten zur Optimierung vorzuschlagen sind, um das Schwingverhalten zu verbessern. Aber auch ein Vergleich der Maschinengenerationen wird angestrebt, um zu überprüfen, inwiefern sich die Maschinen im Laufe der Zeit im Bezug auf Schwingungen weiterentwickelt haben. Die Ergebnisse sind aus konstruktiver Sicht bewertet. Zudem wird ein Einblick in den Messaufbau und Messablauf gegeben. Außerdem erfolgt eine Überprüfung des Messsystems anhand eines vereinfachten Modells, welches sich leicht nachrechnen lässt. Aber auch der Versuch Schwingungen nur mathematisch zu bestimmen, wird anhand einer Maschine aufgezeigt.

2 Anforderungen Bachelorprojekt

Es sollen experimentelle Schwingungsmessungen an den Bewegungssystemen von Lasermaschinen der Firma Laservorm GmbH Altmittweida durchgeführt werden. Zugleich kann ein Vergleich zwischen den älteren Maschinen und Maschinen jüngster Generation stattfinden. Somit soll die Entwicklung aus schwingungstechnischer Sicht dokumentiert werden. Durch die Messungen müssen vor allem Schwingungsamplituden ermittelt werden, um abzuschätzen inwieweit diese Auswirkungen auf den Fertigungsprozess haben. Die Schwingungsmessung wird mit zwei 3D-Beschleunigungssensoren der Firma Freescale durchgeführt. Ein Sensor wird dabei als Referenzsensor genutzt. Es sollen Schwingungen in den Richtungen X, Y und Z des Maschinenkoordinatensystems rechnergestützt erfasst werden. Für die Umsetzung der Messung ist die Nutzung der vorhandenen Hardwarekomponenten und Software möglich. Durch Integrationsoperationen sollen aus den Beschleunigungswerten Geschwindigkeiten und Schwingamplituden errechnet werden. Eine visuelle Darstellung der Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Amplituden in Form von Diagrammen dient der Veranschaulichung. Die Auswertung kann nur aus maschinentechnischer Sicht erfolgen. Denn für eine technologische Betrachtungsweise wären die Schwingzustände im Brennpunkt aufzunehmen, welche durch geometrische Beziehungen errechnet werden könnten. Allerdings ergeben sich aufgrund der Vielzahl von Optikbauelementen, die in verschiedensten Weisen angeordnet werden können, auch entsprechend unterschiedliche Abstände zum Werkstück. Diese Abstände sind jedoch ausschlaggebend, inwieweit sich die Schwingungen am Brennfleck auswirken. Zudem führt die Variation von Optikkomponenten eine Massen- und Schwerpunktsverlagerung herbei, was wiederum Einfluss auf den Schwingzustand hat. Deshalb kann das Bewegungssystem nur maschinentechnisch ausgewertet werden. Es sollen also nur Schwingungen innerhalb des Bewegungssystem betrachtet werden. Des weiteren sind mögliche Ursachen für Schwingzustände im Bewegungssystem anzugeben. Möglichkeiten zur Verbesserung dürfen aufgezeigt werden. Da eine derartige Schwingungsmessung erstmalig in der Firma durchgeführt wird, soll diese Grundlagen bieten, auf denen zukünftige Versuche aufbauen. Somit ist auch der Messaufbau und Messablauf wiederzugeben.

3 Grundlagen

3.1 Schwingungen

Schwingungen sind Bewegungsänderungen aus der Nulllage eines Systems. Sie werden durch die Amplitude und Frequenz bestimmt. Schwingungen können nach ihrer Bewegungsform unterschieden werden (Abb. 1). So können sie periodisch, d. h. als zyklisch wiederkehrendes Signal, oder nicht periodisch auftreten. Des weiteren können sie auch als stochastische Signale, also unregelmäßig, verlaufen. Die Ursache von Schwingungen kann verschieden sein. Als freie Schwingungen werden die Schwingungen bezeichnet, die nach einer einmaligen Energiezufuhr sich selbst überlassen werden und keinen weiteren äußeren Einfluss erfahren. Die Größe dieser Schwingungen hängt dabei von den Anfangsbedingungen ab. Tritt eine Energiezufuhr in das Schwingungssystem während des Schwingvorgangs auf, wird das als eine erregte Schwingung bezeichnet. Solche Zustände können fremd- oder selbsterregt sein. Zusätzlich können alle Schwingzustände gedämpft oder ungedämpft ablaufen. Ungedämpfte Schwingungen sind in der Realität jedoch nicht möglich, werden aber oft bei Systemen mit schwacher Dämpfung als Vereinfachung zur Berechnung verwendet.

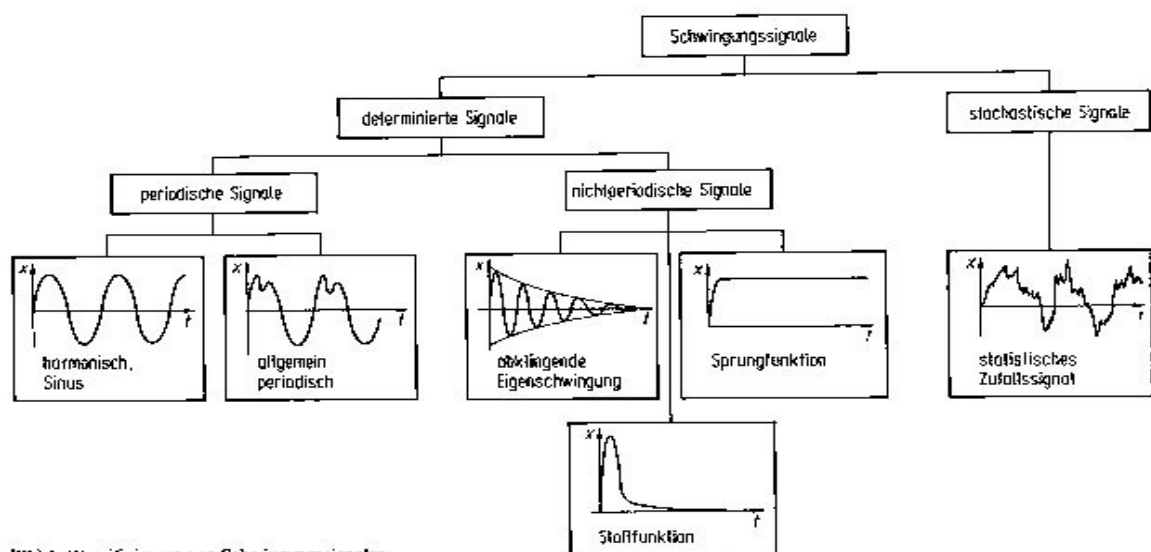


Bild 6. Klassifizierung von Schwingungssignalen

Abbildung 1: Klassifizierung von Schwingungen (Quelle /5/)

3.2 Schwingungsmessung

Im Vergleich zu den gefahrenen WZ-Bewegungen sind die Schwingungsbewegungen recht klein, jedoch dürfen diese nicht unberücksichtigt bleiben. Besonders im Resonanzfall, also wenn die Eigenfrequenz des Systems mit der Erregerfrequenz übereinstimmt, können sich die Amplituden enorm verstärken. Dies kann soweit führen, dass zulässige Spannungswerte des Materials überschritten werden. Schäden bis hin zur Zerstörung des Bauteils sind die Folge. Aber auch schon schwache Schwingzustände können sich fatal auf Fertigungsprozesse auswirken. Vor allem bei Prozessen, wie sie auch in der Laserbearbeitung angewandt werden, die hohe Präzision und hohe Prozessgeschwindigkeit erfordern. Für die experimentelle Schwingungsmessung können verschiedene Sensoren angewandt werden. Dabei unterscheidet man in Wegaufnehmer, Geschwindigkeitsaufnehmer und Beschleunigungsaufnehmer. Wegaufnehmer nutzen die durch Schwingungen hervorgerufene Induktivitätsänderungen bzw. Kapazitätsänderungen im Sensor. Geschwindigkeits- und Beschleunigungssensoren bauen auf den Wegaufnehmer auf, wobei die Wegmesssignale entsprechend elektronisch zu Geschwindigkeiten und Beschleunigungen differenziert werden. Als Beschleunigungssensoren werden üblicherweise auch sogenannte seismische Aufnehmer verwendet. Seismische Aufnehmer stellen ein Masse-Feder-Dämpfungssystem dar. Eine bewegliche Masse wird als seismische Masse bezeichnet und erfährt durch die Schwingungen eine relative Auslenkung zum Gehäuse. Diese Auslenkung wird wiederum von einem Wegaufnehmer erfasst und kann auf die Beschleunigung zurück differenziert werden. Des weiteren werden piezoelektrische Beschleunigungssensoren genutzt (Abb. 2). Dabei ist eine Seite des piezoelektrischen Materials mit der seismischen Masse verbunden. Die Gegenseite ist fest im Sensor angebracht. Wenn diese Kombination in Schwingung versetzt wird, wirkt über die seismische Masse eine Kraft auf das Piezoelement. Durch dessen piezoelektrischen Effekt entsteht eine elektrische Spannung an den Elektroden, die proportional zur Kraft und damit auch zur Beschleunigung ist.

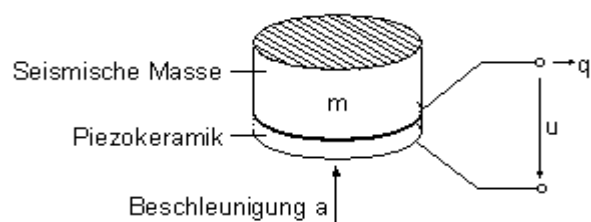


Abbildung 2: Piezoelektrischer Sensor
(Quelle /1/)

3.3 Messaufbau

Für die Messung werden zwei 3D-Beschleunigungssensoren genutzt (Abb. 3). Sie erfassen Beschleunigungen in den Richtungen X, Y und Z des Maschinenkoordinatensystems und geben diese als elektrische Spannungssignale aus. Die Beschleunigungssensoren sind entsprechend der Messaufgabe am Bewegungssystem der Maschine angeordnet und per Schraubenverbindung befestigt. Der Sensormessbereich wird auf $\pm 1,5g$ auf der Verstärkerplatine eingestellt. Weitere wählbare Messbereiche sind $\pm 2g$, $\pm 4g$ und $\pm 6g$. Für die Messung ist eine externe Spannungsversorgung von 0V bis 24V der Verstärkerplatine nötig. Diese erfolgt mittels eines externen Netzteil. Die eingehenden Beschleunigungsspannungen werden anschließend mittels Verstärkerkarte transformiert. Die Transformation erfolgt proportional zur Eingangsspannung von 0V bis 3,3V auf die Ausgangsspannung im Bereich von 0V bis 10V. Eine Messwerterfassungseinheit kann das analoge Spannungssignal erfassen, in ein digitales Signal umwandeln und die Daten an den Computer weiterleiten. Ein USB-Kabel stellt dabei die Verbindung zwischen der Messwerterfassungseinheit und dem Computer her. Mithilfe spezieller Software können die Daten im PC eingelesen werden. Im genannten Fall werden die Messwerterfassungseinheit und -software der Firma AGILENT genutzt. Im Software-Programm müssen zur Datenerfassung verschiedene Einstellungen vorgenommen werden. Während der Messung besitzt jede Messrichtung einen eigenen Kanal. Die erfassten Messwerte werden als Spannungssignal im Bereich von 0V bis 10V als CSV- Datei mitgeloggt. Für die Messung muss die Abtastrate vorgewählt werden. Die Abtastrate gibt an, wie häufig das Spannungssignal des Sensors pro Sekunde abgetastet und aufgenommen wird. Je höher sie gewählt wird, desto genauer und präziser ist die Messung. Jedoch steigt mit der Erhöhung auch der Speicherbedarf bzw. ist eine Erhöhung für den Anwendungsfall nicht unbedingt notwendig. Allgemein gilt je hochfrequenter der Schwingungszustand, desto höher ist auch die Abtastrate zu wählen. So soll die Abtastfrequenz laut Abtasttheorem mindestens doppelt so hoch sein, wie die Maximalfrequenz des Schwingzustandes. Obwohl eine Abtastrate von 200Hz ausreichend wäre, wird sie auf 10000 Hz voreingestellt. Der Grund dafür liegt in den folgenden Integrationsoperationen der Beschleunigungswerte zur Geschwindigkeit und Amplitude. Dabei verringert sich der systematische Fehler der Integration je kleiner der zeitliche

Abstand der Messwerte ist. Die Teilintegrale werden damit kleiner und die Integrationsrechnung „fehlerärmer“. Um die Schwingungen im Bewegungssystem zu erzeugen wird ein steuerungsabhängiges CNC-Programm geschrieben, welches in der Maschine hinterlegt ist und während der Messung abgearbeitet wird. Zuvor wird das Bewegungssystem manuell weit möglichst in Y- und Z- Richtung ausgefahren, um die Schwingfähigkeit des Systems zu maximieren.

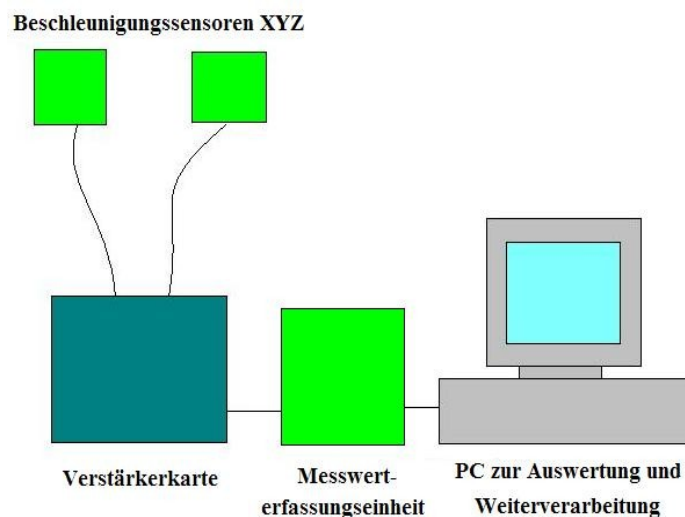


Abbildung 3: Messsystem

Beispiel für CNC-Programm:

```
N10 (Test_Achse)
N20 G91
N30 G01 X+100 F10000
N40 G01 X-100 F10000
N50 M30
```

Es wird eine Relativbewegung der Optik in X- Richtung der Maschine vollführt. Der Bahnverlauf vollzieht dabei eine lineare Bewegung bis zum Umkehrpunkt, um anschließend wieder zum Ausgangspunkt zurückzufahren. Die Werkzeugbewegung wird mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 10000 Millimeter pro Minute ausgeführt. Um diese Geschwindigkeit zu erreichen, beschleunigt die Maschine maximal mit voreingestelltem Wert.

3.4 Prinzip der verwendeten Beschleunigungssensoren

Bei den verwendeten Beschleunigungssensoren handelt es sich um Sensoren der Firma Freescale mit der Bezeichnung MMA7260QT. Normalerweise finden diese Sensoren in Notebooks oder MP3-Playern Anwendung, um sie bei Stößen zu schützen. Für den Einsatz zur Schwingungsmessung an den Maschinen wurden die Platine des Beschleunigungsmesser (Abb. 4) auf jeweils eine Aluminiumplatte aufgebracht. Enthaltene Bohrungen in der Platte ermöglichen die Befestigung der Sensoren während der Messung am System. Des weiteren ist jeder Beschleunigungssensor von einer Abschirmung aus Blech umgeben. Sie soll den Einfluss von elektromagnetischen Störfeldern auf die Messung verhindern. Die Messrichtungen der Beschleunigungssensoren sind der Darstellung auf der Abschirmung zu entnehmen. Die Beschleunigungserfassung basiert auf Kapazitätsänderungen. Dabei befindet sich eine bewegliche massebehaftete Platte zwischen zwei feststehenden Kondensatorplatten (Abb. 5). Erfolgt eine Beschleunigung, verändert sich der Abstand zwischen beweglicher und feststehenden Platten. Diese Veränderung der Abstände führt zu einer Änderung der Kapazität beiderseits der beweglichen Platte, laut der Formel: $C = A \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 / d_c$. Diese Kapazitätsänderung bewirkt wiederum eine dazu proportionale Spannungsänderung. Aus der Differenz zwischen beiden Spannungen lässt sich der Weg ermitteln, welcher zweifach zeitlich differenziert wird, um die Beschleunigung zu ermitteln. Die Beschleunigungen werden als elektrisches Spannungssignal ausgegeben und können weiterverarbeitet werden.



Abbildung 4: Sensorplatine
(Quelle /2/)

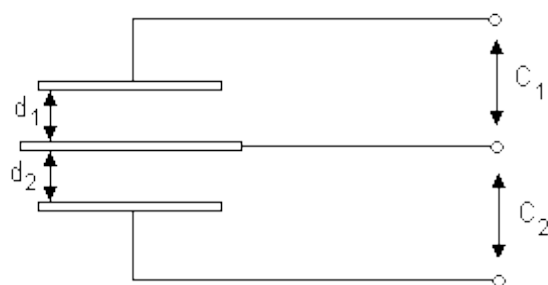


Abbildung 5: kapazitiver Beschleunigungssensor
(Quelle /3/)

3.5 Ermittlung der Amplituden und Geschwindigkeiten aus den Beschleunigungswerten

Die erfassten Beschleunigungswerte können in Geschwindigkeiten und Amplituden verrechnet werden. Zur Ermittlung der Schwinggeschwindigkeit müssen die Beschleunigungen integriert werden. Durch doppelte Integration lassen sich die Amplitudenwerte der Schwingungen errechnen. Zunächst wird die CSV-Datei in ein Tabellenverarbeitungsprogramm eingelesen. Die mitgeloggte CSV-Datei enthält pro Zeile 7 Werte (Abb. 6). Der erste Wert entspricht der Zeit in ms, die mit Beginn der Messung startet. Die Werte 2 bis 7 enthalten die Beschleunigungswerte als Spannungssignal in Volt. Die Werte 2 bis 4 sind Sensor 1 zugeordnet. Wert 2 stellt die Beschleunigungen in X- Richtung dar, Wert 3 in Y- Richtung und Wert 4 in Z- Richtung. Die Werte 5, 6 und 7 jeder Zeile entsprechen den Richtungen X , Y und Z des zweiten Sensors. Jede Zeile der CSV entspricht einer Abtastung. Zur Verarbeitung der Werte wird in hiesigem Fall das Tabellenverarbeitungsprogramm Calc verwendet. Dabei ist darauf zu achten, dass die Datentrennung in der CSV-Datei durch Semikolons erfolgt ist, weshalb diese Trennungsart beim Einlesen in Calc voreingestellt wird. Die Werte werden somit spaltenweise ausgerichtet. Da im Umkehrpunkt des Fahrwegs die größten Schwingausschläge auftreten, soll dieser auch ausgewertet werden. Deshalb muss die Separation jenes Datenbereichs erfolgen. Dafür müssen alle Messwerte der gewünschten Koordinatenrichtungen beider Sensoren als Liniendiagramm in Calc dargestellt werden (Abb.7). Anhand des Kurvenverlaufs lässt sich der entsprechende Abschnitt für eine Schwingung durch Ablesen der Messzeiten herausfiltern. Die Differenz beider Zeitwerte entspricht der Periodendauer. Der erfasste Datenabschnitt wird nun separiert und weiterverarbeitet. Dazu werden die Beschleunigungswerte auf Null abgeglichen und mittels Umrechnungsfaktor von Spannungswerte auf Beschleunigungswerte gebracht. Der Umrechnungsfaktor der Sensoren ist mit $4,0466\text{m/s}^2$ pro Volt im Vorfeld errechnet wurden (Kapitel 3.6) und kann nun entsprechend eingegeben werden. Die Normierung auf Null erfolgt, indem aus den Messwerten einer Datenreihe der Mittelwert gebildet, und dieser von jedem einzelnen Messwert abgezogen wird. Gleichzeitig multipliziert man den Umrechnungsfaktor zur Normierung dazu. Aus diesen Werten kann der Beschleunigungsverlauf des Schwingvorgangs mithilfe des Diagramm-Assistenten dargestellt werden. Zur Integration für die Geschwindigkeit wird die Trapezregel

angewandt. Dabei werden die Teilintegrale der Beschleunigungskurve als Trapez vereinfacht dargestellt. Die restliche Fläche zwischen Trapez und Kurve wird vernachlässigt. Zur Berechnung eines Geschwindigkeitswertes wird zwischen dem dazugehörige Beschleunigungswert und dessen Vorgängerwert der Mittelwert gebildet, welcher wiederum mit der zeitlichen Differenz beider Werte multipliziert wird (Formel 3.2). Anschließend wird dieses Ergebnis noch mit dem vorhergehenden Geschwindigkeitswert addiert (Formel 3.3). Die erhaltenen Werte müssen nun auf Null abgeglichen werden. Dies geschieht äquivalent des vorigen Nullabgleichs. Mithilfe des Diagramm-Assistenten können die gewonnenen Geschwindigkeiten als Kurve dargestellt werden. Die Amplituden werden mittels Trapezregel, ähnlich der vorigen Integration, aus den Geschwindigkeitswerten gebildet (Formel 3.6). Nachdem die Amplitudendaten auf Null abgeglichen sind, erfolgt die Darstellung als Diagramm.

```
0;5,02609252;5,11199951;2,3359680;5,364227294;4,998016358;3,8211059570
1;5,05981445;5,18646240;2,3213195;5,345306396;5,007629395;3,8487243652
2;5,05859375;5,10971069;2,3304748;5,362243652;5,040283205;3,8395690917
3;5,05950927;5,11108398;2,3144531;5,339050292;5,090637207;3,8838195800
...
49999;5,0303649902;5,1626586914;2,2903442382;5,3187561035;4,99633789;3,8639831
```

Abbildung 6: Ausschnitt aus CSV-Datei

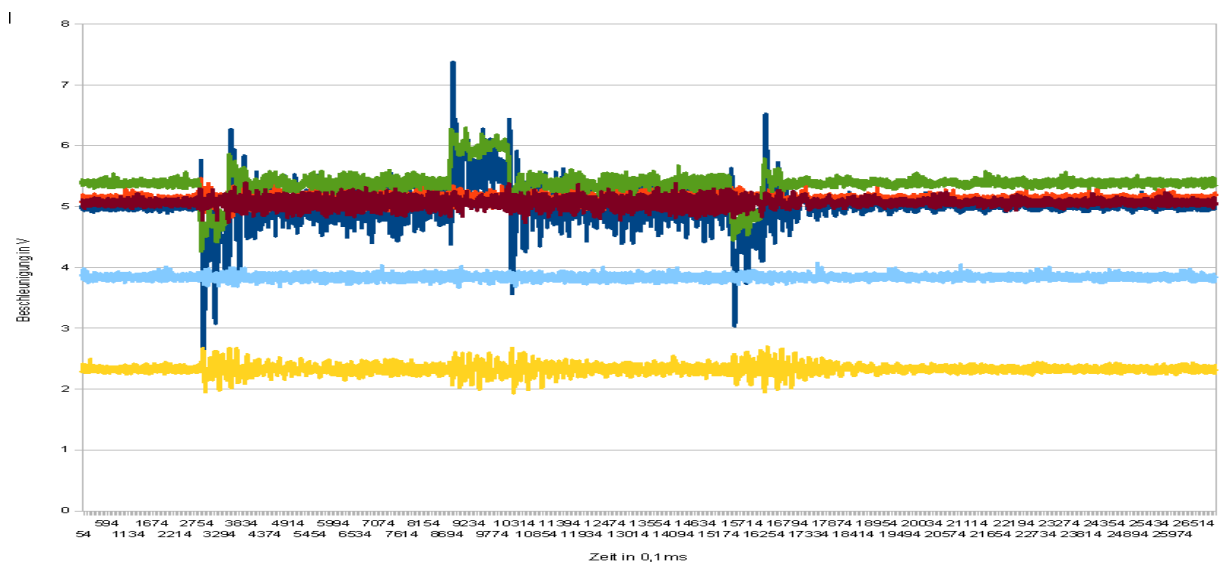


Abbildung 7: Beschleunigungsdatenverlauf einer Messung

Formeln zur Berechnung der Geschwindigkeit und der Amplituden:

$$v = \int (a) * dt \quad (3.1)$$

$$v_2 - v_1 = \int_{t_1}^{t_2} a(t) * dt \approx (a_1 + a_2) / 2 * \Delta t \quad (3.2)$$

$$\underline{v_2 = (a_1 + a_2) / 2 * \Delta t + v_1} \quad (3.3)$$

$$s = \iint a(t) * dt = \int v(t) * dt \quad (3.4)$$

$$s_2 - s_1 = \iint_{t_1}^{t_2} a(t) * dt = \int_{t_1}^{t_2} v(t) * dt \approx (v_1 + v_2) / 2 * \Delta t \quad (3.5)$$

$$\underline{s_2 = (v_1 + v_2) / 2 * \Delta t + s_1} \quad (3.6)$$

3.6 Berechnung Umrechnungsfaktor

Die Beschleunigungssensoren können mittels Steckbrücken auf verschiedene Messbereiche eingestellt werden. Dies ermöglicht je nach Anwendungsfall die Aufnahme von Messwerten im Bereich von $\pm 1,5g$, $\pm 2g$, $\pm 4g$ und $\pm 6g$. Der Bereich ist möglichst niedrig für die Messaufgabe zu wählen und sollte nur bei Überschreitung des Messbereiches erhöht werden. Eine hohe Auflösung der Messwerte ist damit erreichbar. Für die durchgeführten Messungen wird der kleinste Messbereich von $\pm 1,5g$ verwendet. Der Umrechnungsfaktor S beträgt somit $4,0466 \text{ m/(s}^2 * \text{V)}$. Die Spannungsausgabe des Beschleunigungssensors liegt bei $0V$ bis $3,3 \text{ V}$, wobei laut Datenblatt (Anlage 1) 800 mV je $1g$ entsprechen. Der Messverstärker gibt das Spannungssignal mit 0 bis $10V$ aus. Es folgt die Rechnung:

$$S = \Delta U_s / (\Delta U_{MV} * K) \quad (3.7)$$

$$\Delta U_{MV} = 10V \quad (\text{Angabe Messverstärker})$$

$$\Delta U_s = 3,3 V \quad (\text{Datenblatt Sensor/ Anlage 1})$$

$$K = 0,8 V/g \quad (\text{Datenblatt Sensor Anlage 1})$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\underline{S = 4,0466 (m/s^2) / V}$$

3.7 Ursachen von Messfehlern

Messfehler können unterschiedliche Ursachen haben. So wirken sich elektromagnetische Störfelder negativ auf die Messung aus, da sie elektrische Ströme ins Messsystem induzieren. Denn schon geringe Spannungsabweichungen im Millivoltbereich, während der Messung, führen zu Fehlern. Störfelder werden beispielsweise durch die elektrischen Antriebsmotoren des Bewegungssystems erzeugt, und können die Messung soweit beeinträchtigen, dass diese unbrauchbar wird. Deshalb ist es äußerst wichtig, den Messaufbau vor solchen Störfeldern zu schützen. Wobei die elektrischen Komponenten, wie beide Sensoren und die Messverstärkerkarte, durch Abschirmungen aus Blech geschützt werden. Ein weiteres Fehlerpotenzial liefern die elektrischen Steckverbindungen. Verunreinigungen an deren Kontakten führen zu Spannungsabfällen, die das Messergebnis verfälschen. Deshalb ist darauf zu achten, diese Steckverbindungen sauber zu halten. Die Kabellänge zwischen den Messkomponenten soll möglichst kurz sein, um Leitungswiderstände gering zu halten. Außerdem sind die Sensoren an ebenen Flächen des Bewegungssystems entsprechend anzubringen. Dabei ist auf ein festes Anliegen zu achten, damit sich die Schwingzustände des Systems auf den Sensor übertragen lassen. Eine Schraubverbindung zwischen beiden ermöglicht diesen festen Sitz. Eine weitere Ursache für Schwingzustände ist die Überschreitung des Messbereiches. Ist dies der Fall können die Messwerte nicht mehr vollständig erfasst werden. Um das zu prüfen, können die erfassten Beschleunigungswerte innerhalb der Messwerterfassungssoftware als Vorschau dargestellt werden. Alle Messwerte müssen innerhalb der vorgeschriebenen Grenzen von 0V bis 10V liegen. Werden Messwerte mit genau 0V bzw. 10V angezeigt, ist das ein Zeichen für Messbereichsüberschreitung. Die Auswahl eines größeren Messbereichs ist dann erforderlich. Natürlich besitzt auch der Beschleunigungssensors selbst einen Anteil am Gesamtfehler. Auf dessen Fehlergröße nehmen beispielsweise Temperaturabweichungen Einfluss (Anlage 1). Aber auch die Eigenmasse des Sensors bewirkt eine Veränderung des Schwingverhaltens, welche meist sehr gering, aber dennoch vorhanden ist. Da jedoch alle Störgrößen nie komplett unterdrückt werden können, liegt ein sogenanntes Rauschen während der Schwingungsmessung an. Eine überlagerte Schwingung stellt sich ein. Eine hundertprozentig fehlerfreie Messung ist also auszuschließen.

4 Schwingtest

4.1 Ersatzmodell

Um zu beweisen, dass der Messaufbau für die Messaufgabe anwendbar ist, und zugleich die Richtigkeit der gewonnenen Ergebnisse gewährleistet, ist es von Vorteil die Messung an einem Ersatzmodell durchzuführen (Abb. 8). Fehler in der Messtechnik können so frühzeitig erkannt werden. Dazu wird ein sehr vereinfachtes Modell vermessen und anschließend die gewonnenen Ergebnisse durch eine Nachrechnung überprüft. Ein Beschleunigungssensor wird dabei an einem Stahlblock mit der Masse m_{SK} befestigt. Der Stahlblock ist an einem Stangenende angebracht. Die Gegenseite der Stange aus Stahl ist im Dreibackenspannfutter fest horizontal eingespannt. Diese Anordnung beschreibt ein einfaches Feder-Masse-System. Die Feder wird dabei durch die Biegesteifigkeit der Stahlstange realisiert. Das System befindet sich in seiner Nulllage. Aufgrund einer zusätzlichen Masse m_{zu} , die mittels Faden hängend am Stahlklotz angebracht wird, lenkt das System statisch aus. Die Federkraft F_D ist dabei gleich groß vom Betrag wie die Erdanziehungskraft F_{gges} des Systems. Für die Messung muss der Faden gekappt werden. Die Federkraft ist nun schlagartig größer als die Erdanziehungskraft. Der Schwinger wird nach oben auslenken und eine Schwingung stellt sich ein. Theoretische Beschleunigungswerte lassen sich mittels Bewegungsgleichung ermitteln und mit den gemessenen Daten vergleichen (Tabelle 1). Da das System als ungedämpft angesehen wird, jedoch im Realen eine Dämpfung besitzt, wird nur die erste Schwingperiode ab der Nulllage zur Auswertung herangezogen. Jeder Sensor wird einzeln in jeder Messrichtung vermessen. Die Abtastrate ist auf 1000 Hz voreingestellt.

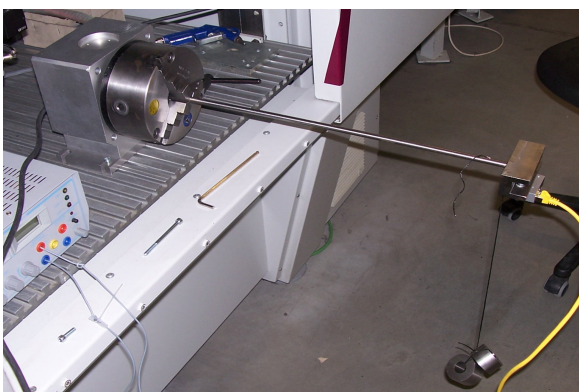
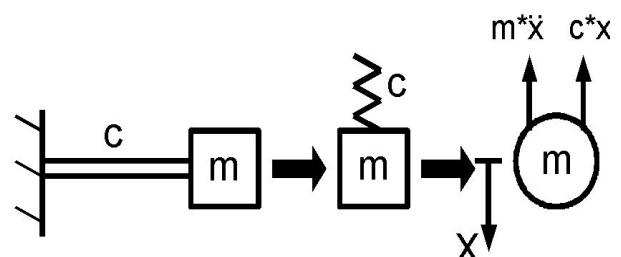


Abbildung 8: Schwingtest als Feder-Masse-System



4.2 Theoretische und gemessene Beschleunigungswerte

$$F_D = c * x_{max} = -m_{zu} * g = -F_{gz} \quad (4.1)$$

$$x_{max} = -m_{zu} * g / c \quad (4.2)$$

$$x = F * l^3 / (3 * E * I) \quad (\text{FuT-MB 9.7 Quelle: /4/}) \quad (4.3)$$

$$c = 3 * E * I / l^3 \quad (4.4)$$

$$m_{zu} = 0,85 \text{ kg} \quad (\text{gemessen})$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{FuT-MB 9.5 Quelle: /4/})$$

$$I = \pi * d^4 / 64 \quad (\text{FuT-MB 9.8 Quelle: /4/}) \quad (4.5)$$

$$d = 9 \text{ mm} \quad (\text{gemessen})$$

$$l = 490 \text{ mm} \quad (\text{gemessen})$$

$$I = 322,1 \text{ mm}^4$$

$$c = 1,725 \text{ N/mm}$$

$$x_{max} = -4,84 \text{ mm}$$

$$m * \ddot{x} + c * x = 0 \quad (\text{Dubbel B38- 4.1.1 Quelle: /5/}) \quad (4.6)$$

$$x_{max} \leq x \leq -x_{max}$$

$$m = m_{SK} + m_S + 33/140 * m_F \quad (\text{Dubbel B39- 4.1.1 Quelle: /5/}) \quad (4.7)$$

$$m_{SK} = 0,73 \text{ kg} \quad (\text{gemessen})$$

$$m_S = 0,09 \text{ kg} \quad (\text{gemessen})$$

$$m_F = 0,285 \text{ kg} \quad (\text{gemessen})$$

$$m = 0,887 \text{ kg}$$

$$\ddot{x} = -c * x / m \quad (4.8)$$

Für 5 Amplituden x werden die Beschleunigungswerte errechnet und zusammen mit den gemessenen Werten in Tabelle 2 eingetragen.

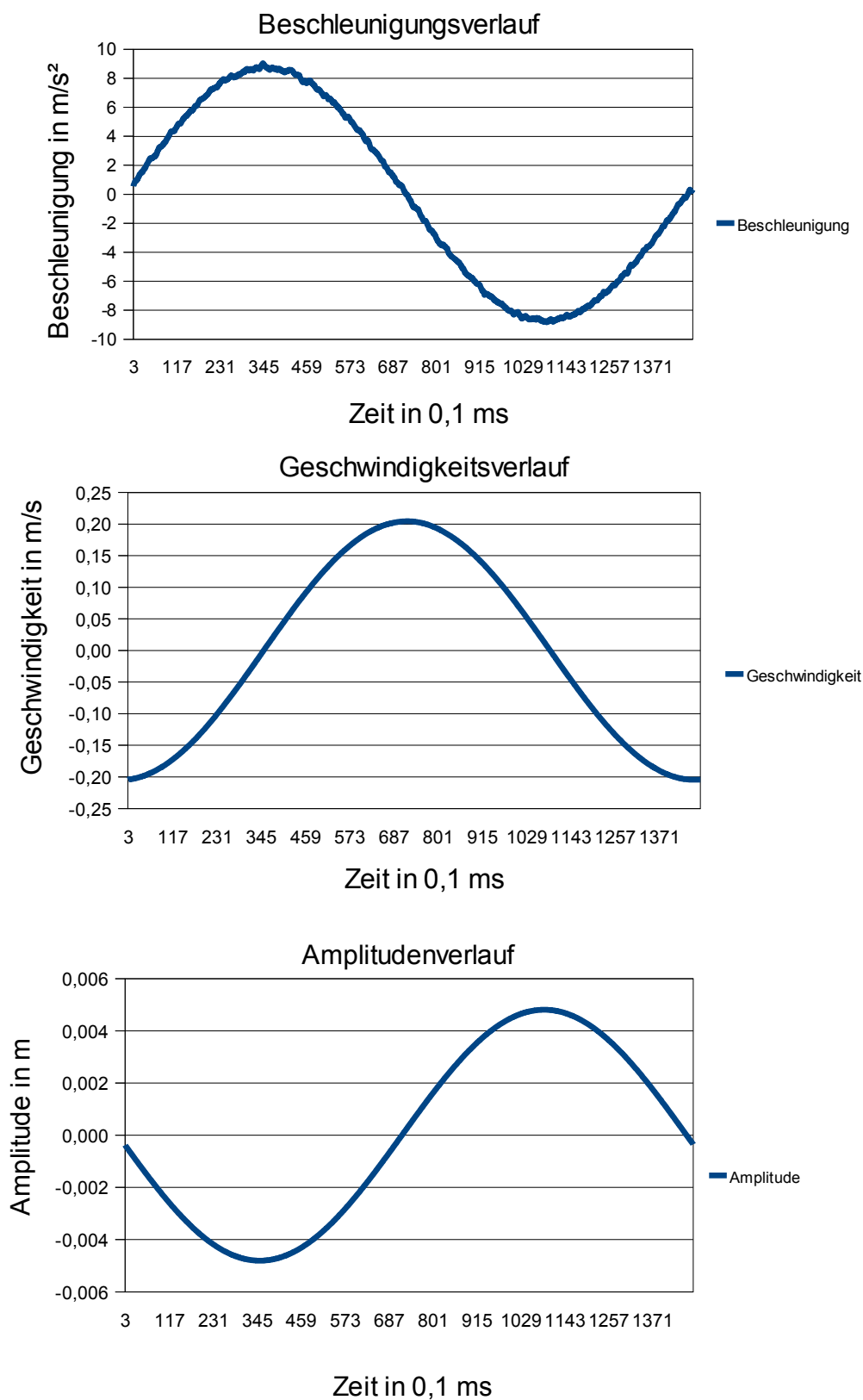


Abbildung 9: Beschleunigungs-, Geschwindigkeits- und Amplitudenverlauf der 1. Schwingung nach Kappen des Fadens der Datei *SI_y.csv*

Dateiname	max.a [m/s²]	max.v [mm/s]	max.s [mm]
S1_x.csv	10,85/-10,91	210,65/-221,1	4,83/-4,83
S1_y.csv	9,05/-8,84	204,47/-204,54	4,81/-4,81
S1_z.csv	8,97/-8,89	202,05/-205,96	4,68/-4,68
S2_x.csv	9,6/-9,33	203,23/-207,5	4,74/-4,74
S2_y.csv	8,64/-8,68	202,28/-203,15	4,77/-4,77
S2_z.csv	9,37/-9,19	211,19/-212,95	4,91/-4,91

Tabelle 1: max. Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Amplituden des Schwingtests

x [mm]	\ddot{x} errechnet [m/s²]	\ddot{x} gemessen [m/s²]
-4	7,77	7,52
-1	1,94	1,86
0,1	-0,23	-0,24
1	-1,94	-1,82
4	-7,77	-7,59

Tabelle 2: Gegenüberstellung errechneter und gemessener Beschleunigungen des Schwingtests

Eine Schwingperiode beträgt 147,5 Millisekunden. Die Abweichungen zwischen den gemessenen und errechneten Werten begründen sich in der Dämpfung, die bei der Rechnung nicht berücksichtigt wird, in der Realität jedoch vorhanden ist. Aber auch die durch das Kappen des Fadens eingeleitete Impulse veranlassen eine Abweichung vom idealen Schwingzustand. Bei den kleinen Auslenkungen auf der Beschleunigungskurve (Abb. 9), handelt es sich um eine überlagerte Schwingung. Sie ist darauf zurückzuführen, dass der Messaufbau nicht hundertprozentig exakt vertikal schwingt. Der Grund dafür ist eine Abweichung des realen vom idealen Schwerpunkt des Stahlklotzes, an welchem der Stab zu befestigen ist. Geringe horizontale Schwingungen und kleine Torsionsschwingungen entstehen und bewirken diese Überlagerung. Aber auch Rauschen im Messsystem hat Einfluss auf die überlagerte Schwingung. Nichtsdestotrotz darf das Messsystem verwendet werden.

5 LVM 700

5.1 Maschinenvorstellung

Die LVM 700 ist eine Lasermaschine, entwickelt im Jahre 1998. Sie kann in alle drei Bewegungsrichtungen verfahren werden. Ein Spannfutter ermöglicht eine rotatorische Bewegungen des Werkstückes im Bedarfsfall. Das Spannfutter lässt sich auf dem Maschinentisch variabel positionieren. Die Verfahrwege der Maschine betragen in X- Richtung 790mm, in Y- Richtung 490mm und in Z- Richtung kann ein Hub von 550 mm erreicht werden. Die Y- Achse verfährt mittels Schlitten entlang der X- Achse. Auf der Gegenseite ist die Achse im Gegensatz zur LVM 316 jedoch freistehend. An der Y- Achse befindet sich die vertikale Z- Achse der Maschine. Ein Winkel dient zur Befestigung der Optik an dieser verfahrbaren Z- Achse. Die Beschleunigung der LVM 700 ist richtungsabhängig. So wird in X- Richtung mit $0,95 \text{ m/s}^2$, in Y mit $2,6 \text{ m/s}^2$ und in Z- Richtung mit $0,5 \text{ m/s}^2$ beschleunigt.

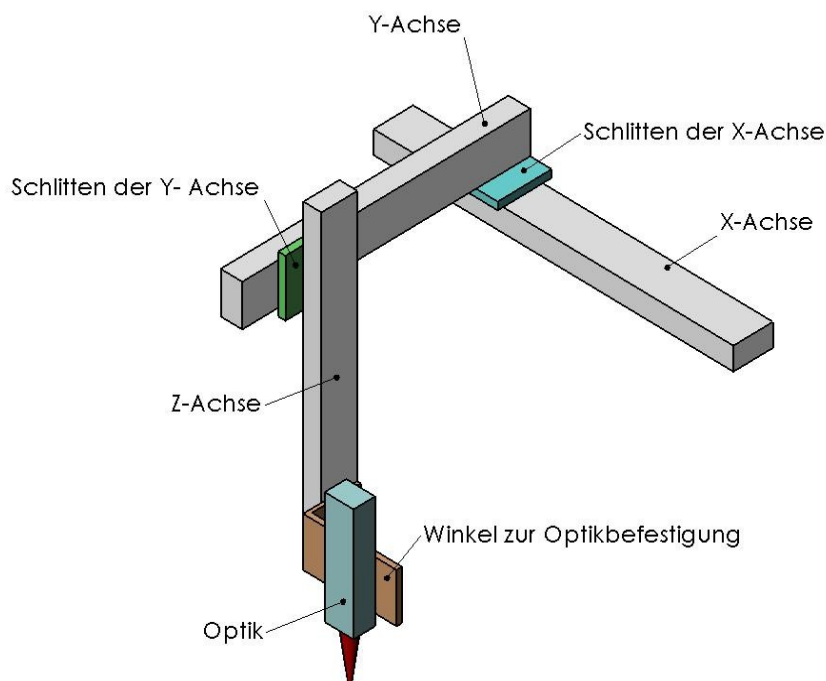


Abbildung 10: Bewegungssystem LVM 700

5.2 Vorgenommene Messungen

Die Beschleunigungssensoren werden für die Schwingungsmessung verschieden zueinander angeordnet. Für den ersten Messdurchgang wird ein Sensor an der Optik und der andere Sensor am Schlitten der X- Achse angeschraubt. So können die Beschleunigungen in X- Richtung von beiden Sensoren parallel erfasst werden. Bei den Messungen in Y- und Z- Richtungen erfasst nur der Optiksensordie direkten Beschleunigungen. Der Sensor am Schlitten der X- Achse dagegen kann nur die übertragenen Maschinenvibrationen erfassen. Für die nächste Messanordnung sitzt der Messsensor am Schlitten der Y- Achse. Der Referenzsensor ist weiterhin am Schlitten der X- Achse befestigt. Mit diese Anordnung kann das Schwingverhalten innerhalb der Y- Achse erfasst werden. Schwingungen in X- Richtung werden von beiden Sensoren direkt aufgenommen. Bei Bewegungen in Y- und Z- Richtung erhält der Messsensor den unmittelbaren Einfluss der Bewegung. Der Referenzsensor verbleibt in Ruhe und misst dagegen nur die induzierten Maschinenvibrationen. Für die letzte Messanordnung wird der Messsensor an die Optik geschraubt und der andere auf den Schlitten der Y- Achse. Die Schwingungsmessung erfolgt während der Maschinenbewegung in allen drei Richtungen. Durch die unterschiedliche Anordnungen der Sensoren zueinander, ist es möglich das System in Teilabschnitte zu zerlegen. Die erfassten Daten ermöglichen eine Auswertung jeder Achse des Bewegungssystems. Schwingungsschwachstellen lassen sich finden. Außerdem können Schwinggrößen über einzelne Abschnitte, sowie das gesamte Bewegungssystem ermittelt werden. Die Maschinenbeschleunigung liegt bei $0,95\text{m/s}^2$ in X, $2,6\text{ m/s}^2$ in Y und $0,5\text{ m/s}^2$ in Z.

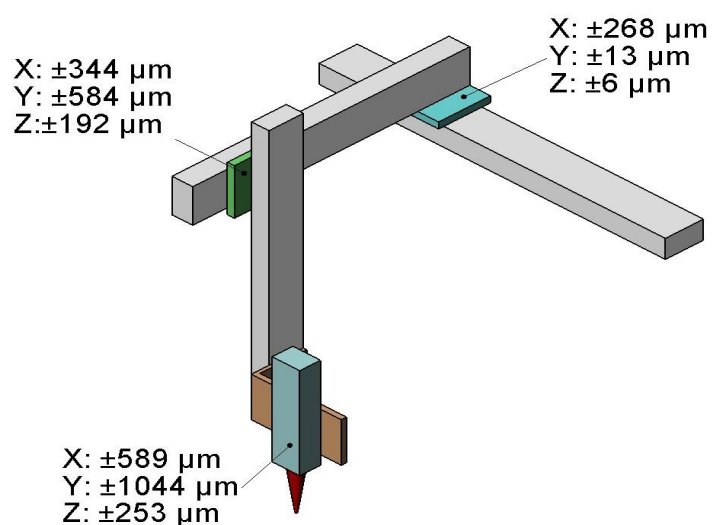


Abbildung 11: gemessene Schwingamplituden im Bewegungssystem

5.3 Ergebnisse

X- Richtung

Mit der Auswertung der Messdaten können Rückschlüsse auf die Schwingamplituden gezogen werden. So wird beispielsweise festgestellt, dass an der Optik der LVM 700 in X- Richtung Schwingungsamplituden von maximal $\pm 589 \mu\text{m}$ auftreten. Der ermittelte Amplitudenwert des Referenzsensors liegt in einer Größe von $\pm 268 \mu\text{m}$ in X an, wobei die Maschine mit $0,95\text{m/s}^2$ beschleunigt. Diese Schwingungen am Schlitten der X- Achse werden vor allem durch die Linearführungskomponenten erzeugt. So federn z. B. die Führungswagen ein, die Antriebsspindel verkürzt oder dehnt sich aufgrund anliegender Zug- und Druckkräfte, und die Lagereinheit des Spindelantriebs verformt sich elastisch. Durch die Nachgiebigkeit der Y- und Z- Achse, sowie deren Verbindungskomponenten verstärkt sich diese Schwingung bis hin zur Optik. Dabei bewirken die Trägheitskräfte der beschleunigten Komponenten die Verschiebung der Achsen, und damit auch stärkere Schwingamplituden. Gleichzeitig verkippen die Achsen zueinander, wobei sich über deren Längen das Schwingverhalten verstärkt. Eine weitere Messanordnung zeigt, dass die Z- Achse am Schlitten der Y- Achse mit $\pm 344 \mu\text{m}$ in X absolut schwingt. Diese Schwingung kann auf die Linearführung zwischen beiden Achsen, sowie auf die Nachgiebigkeit der freihängenden Y- Achse zurückgeführt werden. Damit verstärkt sich die Schwingung über die Y- Achse bis hin zum Schlitten der Y- Achse um $\pm 76 \mu\text{m}$. Über die gesamte Z- Achse bis zur Optik entsteht eine weitere Schwingungsverstärkung um $\pm 245 \mu\text{m}$ der Amplitude auf $\pm 589 \mu\text{m}$ absolut. Diese Erhöhung ist auf die Nachgiebigkeit der Z- Achse, sowie die des Winkels, an dem die Optik befestigt ist, zurückzuführen. Aber auch die Einfederungen der Kugellinearführungen bewirken ein Verkippen der Z- Achse, womit sich der Schwingzustand entlang der Z- Achse erhöht. Da keine Gegenführung existiert werden vor allem die Linearführungen an der X- Achse höher beansprucht, womit sich auch der Verschleiß derer im Laufe der Zeit erhöht. Eine große Optik bewirkt eine zusätzliche Belastung, aufgrund ihrer Trägheit auf das Bewegungssystem. Größere Schwingungsausschläge sind die Folge. Außerdem veranlasst die „übereinander liegende“ Achsanordnung ohne Gegenführungen eine Verstärkung des Schwingverhaltens.

Y- Richtung

Während der Y- Bewegung treten Schwingungen in Höhe von $\pm 1044 \mu\text{m}$ an der Optik und $\pm 13 \mu\text{m}$ am Schlitten der X- Achse auf. Dabei beschleunigt die Maschine mit $2,6 \text{ m/s}^2$. Die durch Messen ermittelte Auslenkung von $\pm 13 \mu\text{m}$ in Y- Richtung am Schlitten der X- Achse ist durch eine indirekte Anregung zu begründen. Wird die Z- Achse in Y- Richtung verfahren, überträgt sie dabei auch Schwingungen in die Y- Achse, welche mit erfasst werden. Auf dem Schlitten der Y- Achse zur Befestigung der Z- Achse werden Schwingungen in Höhe von $\pm 584 \mu\text{m}$ gemessen. Bis zur Optik verstärkt sich dieser Schwingzustand deutlich um $\pm 460 \mu\text{m}$ auf $\pm 1044 \mu\text{m}$. Darauf hat vor allem der Winkel zur Optikbefestigung einen großen Einfluss, welcher sich beim Einwirken von Trägheitskräften der Optik elastisch verbiegt. Aber auch die Nachgiebigkeit der Z- Achse, sowie die der freihängenden Y- Achse bewirken diese Verstärkung mit. Zudem federn die Komponenten des Spindelantriebs entlang der Y- Achse bei Belastung ein, und tragen somit durch Verkippen der Achse zum Schwingverhalten bei.

Z- Richtung

Während am Schlitten der X- Achse nur $\pm 6 \mu\text{m}$ Schwingamplitude in Z- Richtung zu verzeichnen sind, schwingt die Optik mit $\pm 253 \mu\text{m}$. Dabei verstärkt sich der Schwingzustand von $\pm 192 \mu\text{m}$ am Schlitten der Y- Achse auf $\pm 253 \mu\text{m}$ an der Optik bei einer Beschleunigung von $0,5 \text{ m/s}^2$. Als Ursache dafür ist die Nachgiebigkeit der beiden freihängenden Achsen, sowie die des Winkels anzuführen. Die schon aufgeführte Teilauslenkung am Schlitten der Y- Achse von $\pm 192 \mu\text{m}$, begründet sich in der Nachgiebigkeit der Y- Achse in Z- Richtung, der Einfederung der Führungskomponenten und des beinhaltenden Führungsspiels. Der Schwingzustand während der Z- Bewegung, mit einer Auslenkung von bis zu $\pm 6 \mu\text{m}$ am Schlitten der X- Achse, ist als eingeleitete Schwingung zu betrachten.

Dateiname	S1_Ort	S2_Ort	S1_max.a [m/s ²]	S2_max.a [m/s ²]
700_1x.csv	Optik	Schlitten X-Achse	1,63/-2	1,26/-1,14
700_1y.csv	Optik	Schlitten X-Achse	4,02/-3,17	0,37/-0,42
700_1z.csv	Optik	Schlitten X-Achse	1,19/-1,14	0,45/-0,38
700_2x.csv	Schlitten Y-Achse	Schlitten X-Achse	1,62/-1,24	1,07/-1,18
700_2y.csv	Schlitten Y-Achse	Schlitten X-Achse	3,13/-3,12	0,49/-0,53
700_2z.csv	Schlitten Y-Achse	Schlitten X-Achse	0,93/-1,15	0,45/-0,26
700_3x.csv	Optik	Schlitten Y-Achse	1,76/-2,07	1,61/-1,14
700_3y.csv	Optik	Schlitten Y-Achse	4,22/-3,27	3,3/-2,71
700_3z.csv	Optik	Schlitten Y-Achse	1,07/-1,02	0,93/-0,91

Tabelle 3: max. Beschleunigungen der einzelnen Messungen an der LVM 700

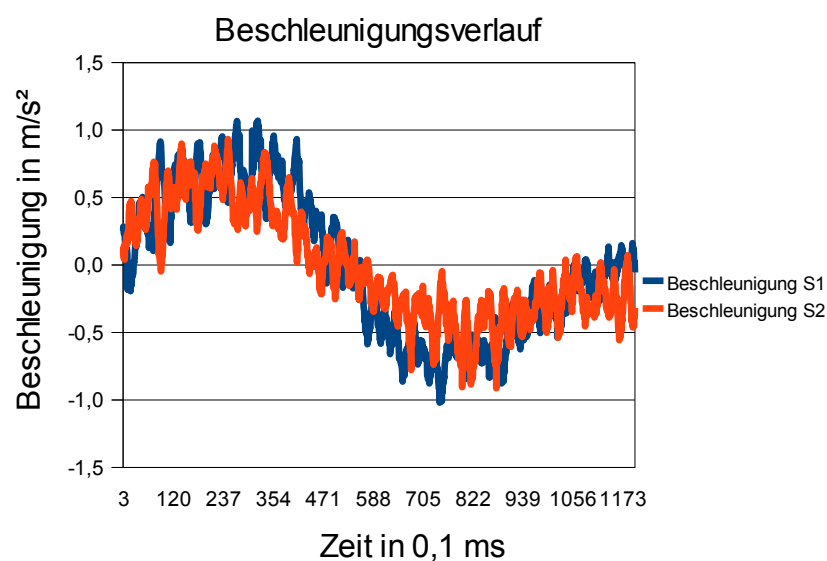


Abbildung 12: Beschleunigungsverlauf der 1. Schwingung im Umkehrpunkt aus der Datei 700_3z.csv

Dateiname	S1_Ort	S2_Ort	S1_max.v [mm/s]	S2_max.v [mm/s]
700_1x.csv	Optik	Schlitten X-Achse	33,04/-30,07	11,78/-19,23
700_1y.csv	Optik	Schlitten X-Achse	56,9/-55,9	1,08/-1,15
700_1z.csv	Optik	Schlitten X-Achse	14,94/-11,81	0,7/-0,68
700_2x.csv	Schlitten Y-Achse	Schlitten X-Achse	14,09/-21,79	11,82/-17,26
700_2y.csv	Schlitten Y-Achse	Schlitten X-Achse	27,08/-38,13	0,84/-1,44
700_2z.csv	Schlitten Y-Achse	Schlitten X-Achse	10,3/-10,83	0,45/-0,52
700_3x.csv	Optik	Schlitten Y-Achse	33,76/-30,43	13,15/-20,96
700_3y.csv	Optik	Schlitten Y-Achse	57,44/-55,97	25,99/-43,64
700_3z.csv	Optik	Schlitten Y-Achse	14,71/-12,12	9,66/-11,23

Tabelle 4: max. Geschwindigkeiten der einzelnen Messungen an der LVM 700

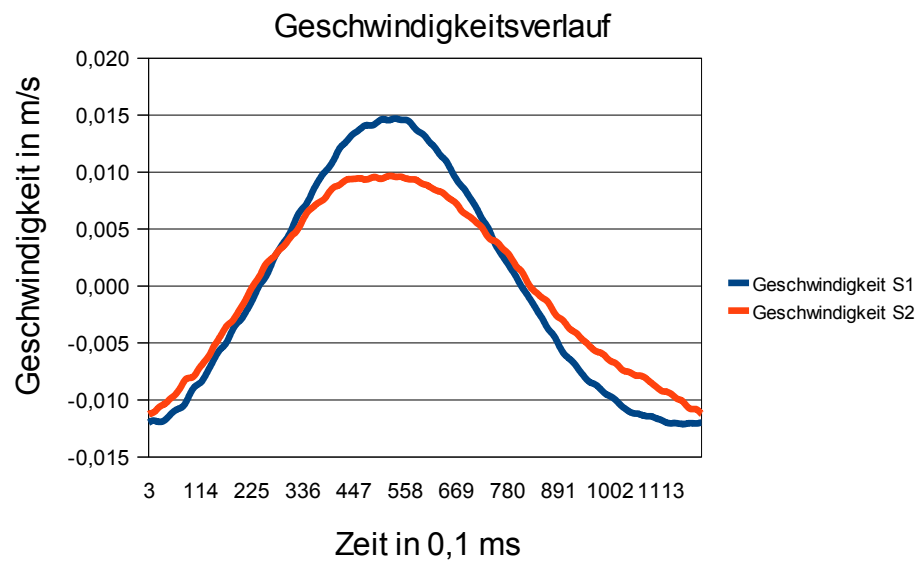


Abbildung 13: Geschwindigkeitsverlauf der 1. Schwingung im Umkehrpunkt aus der Datei 700_3z.csv

Dateiname	S1_Ort	S2_Ort	S1_max.s [μm]	S2_max.s [μm]
700_1x.csv	Optik	Schlitten X-Achse	589/-589	268/-268
700_1y.csv	Optik	Schlitten X-Achse	1044/-1044	13/-13
700_1z.csv	Optik	Schlitten X-Achse	253/-253	6/-6
700_2x.csv	Schlitten Y-Achse	Schlitten X-Achse	344/-344	260/-260
700_2y.csv	Schlitten Y-Achse	Schlitten X-Achse	584/-584	15/-15
700_2z.csv	Schlitten Y-Achse	Schlitten X-Achse	193/-193	5/-5
700_3x.csv	Optik	Schlitten Y-Achse	596/-596	328/-328
700_3y.csv	Optik	Schlitten Y-Achse	1050/-1050	576/-576
700_3z.csv	Optik	Schlitten Y-Achse	256/-256	192/-192

Tabelle 5: max. Amplituden der einzelnen Messungen an der LVM 700

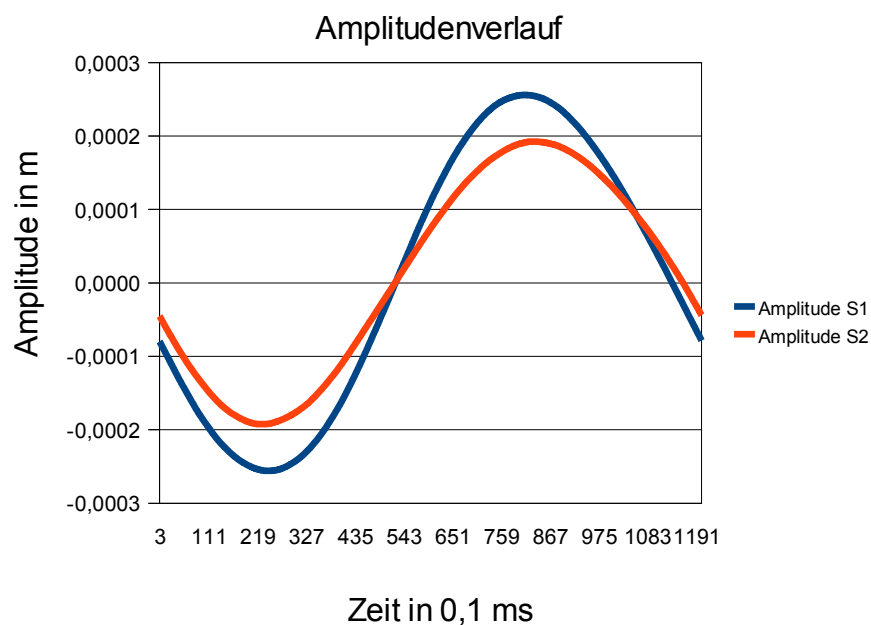


Abbildung 14: Amplitudenverlauf der 1. Schwingung im Umkehrpunkt aus der Datei 700_3z.csv

Der Schwingzustand verstärkt sich vom Schlitten der Y- Achse, über die Z- Achse, bis hin zur Optik. Dies ist deutlich durch den Unterschied in beiden Amplitudenverläufen (Abb. 14) erkennbar. Aber auch die erfahrenen Beschleunigungen und Geschwindigkeiten (Abb. 12+13) sind an der Optik höher. Eine Schwingung an der Optik dauert 120 Millisekunden während der Z- Bewegung.

6 LVM 316

6.1 Maschinenvorstellung

Die LVM 316 ist eine seit 2003 bestehende Maschine zur Laserbearbeitung. Sie kann in X-, Y- und Z- Richtung verfahren werden. Zusätzlich kann ein Spannfutter angesteuert werden, mit welchem auch rotatorische Bewegungen des Werkstückes möglich sind. Das Spannfutter darf auf dem Maschinentisch variabel angeordnet werden. Die Verfahrwege der Maschine betragen 540mm in X, 305mm in Y und 400mm in Z des Maschinenkoordinatensystems. Wobei die Y- Achse mittels Schlitten entlang der X- Achse verfahren werden kann. Auf der Gegenseite wird sie durch eine Führung stabilisiert. An der Y- Achse befindet sich die bewegliche Z- Achse der Maschine. An ihr ist mittels eines Winkels die Optik zur Laserbearbeitung befestigt.

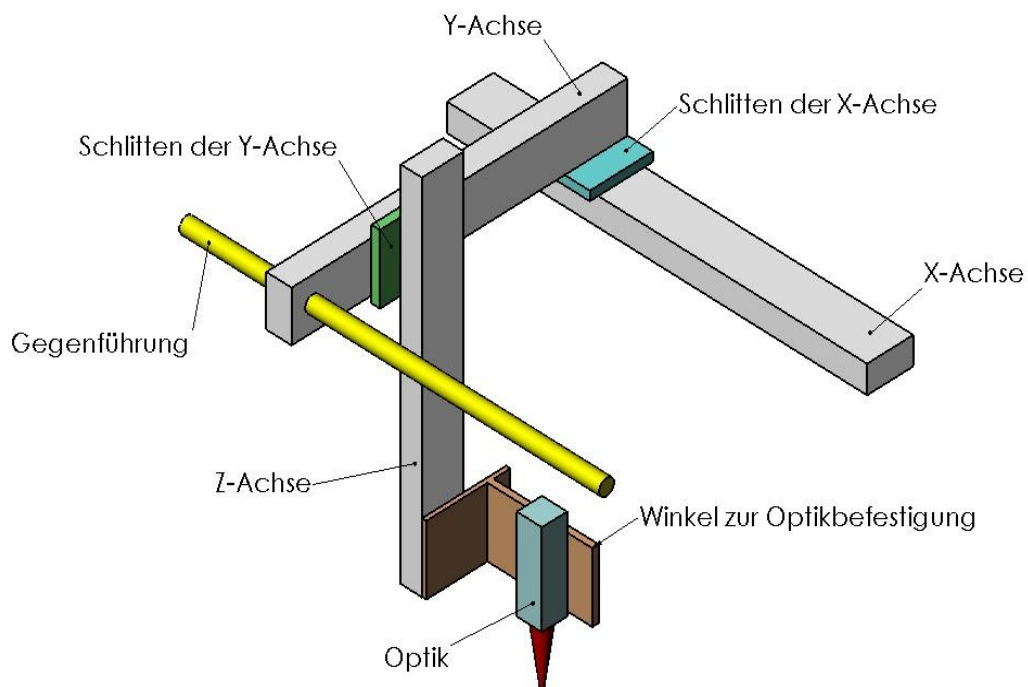


Abbildung 15: Bewegungssystem LVM 316

6.2 Vorgenommene Messungen

Zur experimentellen Schwingungsmessung werden die Beschleunigungssensoren verschieden zueinander angeordnet. Zuerst wird der Messsensor an der Optik befestigt. Der Referenzsensor dagegen ist am Schlitten der X- Achse angeschraubt. Somit können Beschleunigungen in X- Richtung von beiden Sensoren erfasst werden. Bei Beschleunigungen in die beiden anderen Richtungen erfasst nur der Messsensor den direkten Einfluss. Der Referenzsensor kann die übertragenen Maschinenvibrationen aufzeichnen. Für eine weitere Messanordnung befindet sich der Messsensor am Schlitten der Y- Achse. Der Referenzsensor ist weiterhin am Schlitten der X- Achse befestigt. Diese Anordnung dient dem Erfassen des Schwingverhaltens der Y- Achse. Schwingungen in X- Richtung werden von beiden Sensoren direkt erfasst. Bei den Beschleunigungswerten, die in Z erfasst werden, handelt es sich um, auf das System übertragene, Schwingungen. In Y- Richtung erhält der Messsensor den unmittelbaren Einfluss der Bewegung. Der Referenzsensor verspürt dagegen nur die induzierten Vibrationen. Für die letzte Anordnung der Sensoren wird der Messsensor an die Optik geschraubt und der andere auf den Schlitten der Y- Achse. Die Schwingungsmessung erfolgt während der Maschinenbewegung in allen drei Richtungen. Durch die verschiedenen Anordnungen der Sensoren ist es möglich das System in Teilbereiche zu zerlegen, und die gewonnenen Daten abschnittsweise zu bewerten.

Schwingungsverursacher können definiert werden. Aber auch die Größe der Schwingungen über das gesamte Bewegungssystem lässt sich ermitteln. Die Maschine ist auf eine Beschleunigung von $0,6\text{m/s}^2$ in allen Richtungen eingestellt.

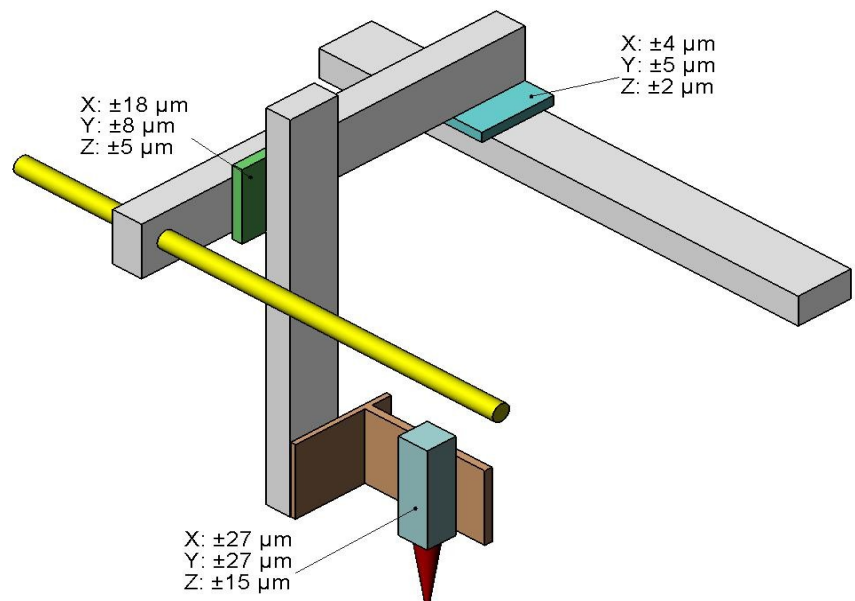


Abbildung 16: gemessene Schwingamplituden im Bewegungssystem

6.3 Ergebnisse

X- Richtung

Nach der Messung wird festgestellt, dass an der Optik zur Laserbearbeitung in X- und in Y- Richtung mit jeweils $\pm 27 \mu\text{m}$ Maximalamplitude ähnliche Schwingungen auftreten. Der ermittelte Amplitudenwert des Referenzsensors liegt in einer Größe von $\pm 4 \mu\text{m}$ in X an. Da der Referenzsensor direkt auf dem Schlitten der X- Achse angebracht ist, kann man daraus schlussfolgern, dass diese Teilschwingung vor allem durch die Linearführungen zustande kommt. Einfederung und Spiel zwischen den Antriebs- und Führungskomponenten sind Grund dafür. Während der X- Bewegung nimmt auch die Kugelführung auf der Gegenseite der Y- Achse Einfluss auf das Schwingverhalten. Die Schwingamplitude wird deutlich verringert, da die Y- Achse stabilisiert wird. Nichtsdestotrotz veranlasst sie den Y- Träger, aufgrund des Reibwiderstands der Kugelführung, leicht entgegen der Bewegungsrichtung zu verkippen und damit auszulenken. Allerdings ist diese Auslenkung um ein Vielfaches kleiner als die Verkipfung der Achse ohne Gegenführung. Anhand einer weiteren Messung kann festgestellt werden, dass die Z- Achse an ihren Anbindung zur Y- Achse mit $\pm 18 \mu\text{m}$ in X- Richtung absolut schwingt. Dies ist wiederum auf die Linearführung zwischen beiden Achsen, aber auch auf die Nachgiebigkeit der Y- Achse, zurückzuführen. Damit wird vom Schlitten der X- Achse über die Y- Achse bis hin zum Schlitten der Y- Achse eine relative Schwingung von $\pm 14 \mu\text{m}$ erzeugt. Über die gesamte Z- Achse bis zur Optik entsteht eine weitere Schwingungsanregung um eine Erhöhung von $\pm 9 \mu\text{m}$ der Amplitude in X auf $\pm 27 \mu\text{m}$. Diese Erhöhung ist auf die Nachgiebigkeit der Z- Achse, sowie die des Winkels, an dem die Optik befestigt ist, zurückzuführen. Beide Komponenten lenken aufgrund der Belastung durch die angreifenden Trägheitskräfte und ihrer begrenzten Steifigkeit aus.

Y- Richtung

Die durch Messen ermittelte Auslenkung von $\pm 5 \mu\text{m}$ in Y- Richtung am Schlitten der X- Achse ist durch eine indirekte Anregung zu begründen. Wird die Z- Achse in Y- Richtung

verfahren, überträgt sie dabei auch Schwingungen in die Y- Achse, welche mit erfasst werden. Am Schlitten der Y- Achse zur Befestigung der Z- Achse werden Schwingungen in Höhe von $\pm 8 \mu\text{m}$ erfasst. Bis zur Optik verstärkt sich der Schwingzustand deutlich um $\pm 19 \mu\text{m}$ auf $\pm 27 \mu\text{m}$. Darauf hat vor allem der Winkel zur Optikbefestigung einen großen Einfluss. Aber auch die Nachgiebigkeit der Z- Achse, sowie die Einfederung und Nachgiebigkeit der Linearführungen und des Spindelantriebs, wirken bei dieser Verstärkung mit ein. Aufgrund der Gegenführung ist nur eine Verkipfung der Z- Achse zur Y- Achse möglich. Das Schwingverhalten ist damit deutlich besser im Vergleich zur LVM 700.

Z- Richtung

Während der Z- Bewegung schwenkt die Optik auf einen Maximalwert von $\pm 15 \mu\text{m}$ aus. Dabei verstärkt sich der Schwingzustand von $\pm 5 \mu\text{m}$ am Schlitten der Y- Achse auf $\pm 15 \mu\text{m}$ an der Optik. Als Ursache dafür ist die Nachgiebigkeit der Achse, sowie die des Winkels anzuführen. Aufgrund der begrenzten Steifigkeit geben sie unter Lasteinwirkung elastisch nach und lenken aus. Die schon angeführte Auslenkung am Schlitten der Y- Achse begründet sich in der Einfederung der Führung und des beinhaltenden Spiels. Der Schwingzustand mit einer Auslenkung von bis zu $\pm 2 \mu\text{m}$ am Schlitten der X- Achse ist als eingeleitete Schwingung zu betrachten.

Dateiname	S1_Ort	S2_Ort	S1_max.a [m/s²]	S2_max.a [m/s²]
1x.csv	Optik	Schlitten X-Achse	0,93/-0,99	0,52/-0,71
1y.csv	Optik	Schlitten X-Achse	0,94/-0,78	0,53/-0,6
1z.csv	Optik	Schlitten X-Achse	0,6/-0,61	0,21/-0,19
2x.csv	Schlitten Y-Achse	Schlitten X-Achse	0,97/-1,28	0,55/-0,72
2y.csv	Schlitten Y-Achse	Schlitten X-Achse	0,72/-0,76	0,24/-0,31
2z.csv	Schlitten Y-Achse	Schlitten X-Achse	0,37/-0,3	0,27/-0,28
3x.csv	Optik	Schlitten Y-Achse	0,97/-0,88	0,87/-0,83
3y.csv	Optik	Schlitten Y-Achse	0,95/-0,91	0,47/-0,66
3z.csv	Optik	Schlitten Y-Achse	0,78/-0,7	0,36/-0,51

Tabelle 6: max. Beschleunigungen der einzelnen Messungen an der LVM 316

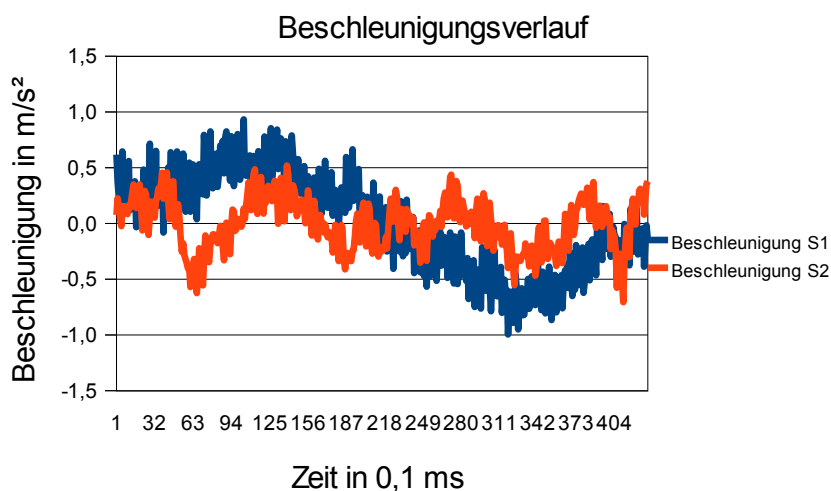


Abbildung 17: Beschleunigungsverlauf der 1. Schwingung im Umkehrpunkt aus der Datei 1x.csv

Dateiname	S1_Ort	S2_Ort	S1_max.v [mm/s]	S2_max.v [mm/s]
1x.csv	Optik	Schlitten X-Achse	3,83/-4,19	0,78/-0,81
1y.csv	Optik	Schlitten X-Achse	3,26/-4,22	0,95/-0,93
1z.csv	Optik	Schlitten X-Achse	1,82/-2,57	0,3/-0,35
2x.csv	Schlitten Y-Achse	Schlitten X-Achse	2,66/-2,79	1,32/-1,53
2y.csv	Schlitten Y-Achse	Schlitten X-Achse	1,46/-1,55	0,79/-0,63
2z.csv	Schlitten Y-Achse	Schlitten X-Achse	0,8/-1,06	0,74/-0,46
3x.csv	Optik	Schlitten Y-Achse	5,53/-4,03	3,15/-3,29
3y.csv	Optik	Schlitten Y-Achse	4,57/-4,73	1,21/-1,7
3z.csv	Optik	Schlitten Y-Achse	1,76/-2,84	1,13/-1,48

Tabelle 7: max. Geschwindigkeiten der einzelnen Messungen an der LVM 316

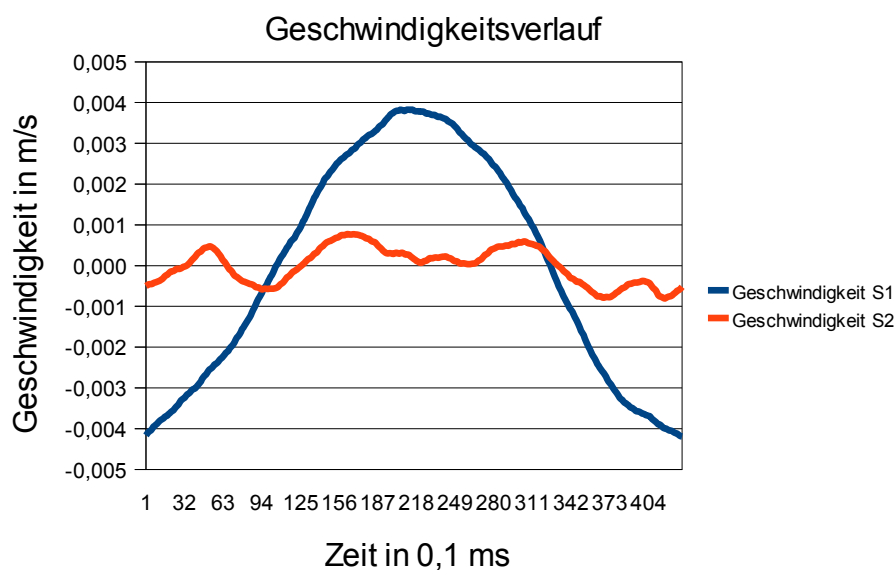


Abbildung 18: Geschwindigkeitsverlauf der 1. Schwingung im Umkehrpunkt aus der Datei 1x.csv

Dateiname	S1_Ort	S2_Ort	S1_max.s [μm]	S2_max.s [μm]
1x.csv	Optik	Schlitten X-Achse	27/-27	4/-4
1y.csv	Optik	Schlitten X-Achse	27/-27	5/-5
1z.csv	Optik	Schlitten X-Achse	15/-15	2/-2
2x.csv	Schlitten Y-Achse	Schlitten X-Achse	18/-18	4/-4
2y.csv	Schlitten Y-Achse	Schlitten X-Achse	8/-8	4/-4
2z.csv	Schlitten Y-Achse	Schlitten X-Achse	5/-5	2/-2
3x.csv	Optik	Schlitten Y-Achse	28/-28	20/-20
3y.csv	Optik	Schlitten Y-Achse	32/-32	10/-10
3z.csv	Optik	Schlitten Y-Achse	14/-14	6/-6

Tabelle 8: max. Amplituden der einzelnen Messungen an der LVM 316

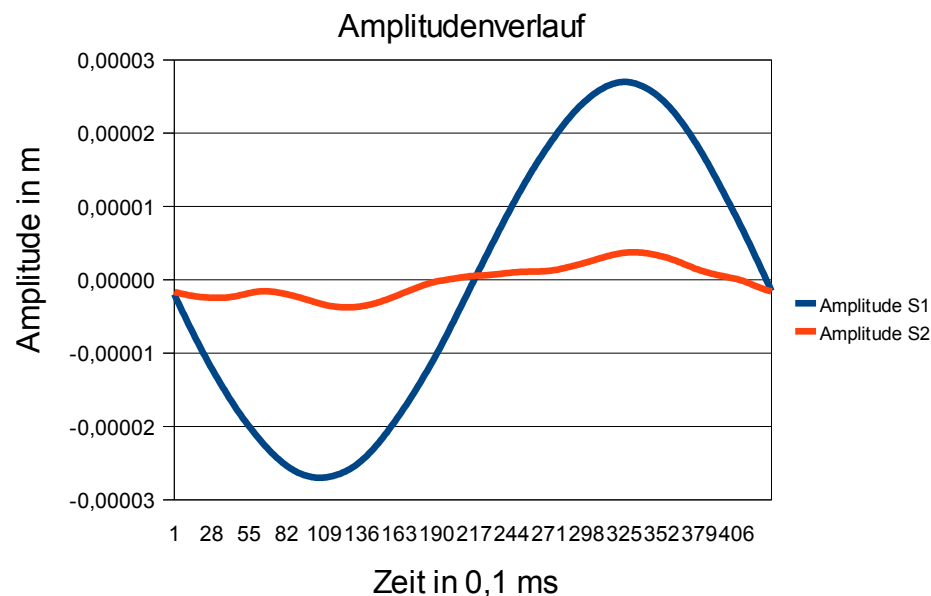


Abbildung 19: Amplitudenverlauf der 1. Schwingung im Umkehrpunkt aus der Datei 1x.csv

Der Beschleunigungsverlauf (Abb. 17) enthält eine durch Störfelder verursachte Überlagerung. Die Beschleunigungen sind an der Optik größer als am Schlitten der X-Achse. Entsprechend höher sind auch Geschwindigkeiten und Amplituden (Abb. 18+19) an der Optik. Die Periodendauer einer Schwingung an der Optik beträgt 43 Millisekunden.

7 Vormer 2

7.1 Maschinenvorstellung

Der Vormer 2 der Firma Laservorm GmbH wurde im Jahre 2007 gebaut. Die linearen Verfahrwege erfolgen in X-, Y- und Z- Richtung der Lasermaschine. Zusätzlich enthält die Maschine eine B- Achse, mit der Drehbewegungen um die Y- Richtung realisiert werden. Auf dem Maschinentisch kann ein Spannfutter positioniert und angesteuert werden, um weitere Drehbewegungen zu erzeugen. Die Verfahrwege der Maschine betragen 1200 X 700 X 800 mm. Y- Bewegung werden durch den verfahrbaren Maschinentisch erzeugt. Die Optik befindet sich drehbar um Y an einem Ausleger, der in X- und Z- Richtung verfährt. Die Z- Achse ist komplett in X verfahrbar. Der Schlitten der Z- Achse kann zusammen mit dem Ausleger in Z- Richtung verfahren werden. Der Ausleger ist als Steckschweißkonstruktion hergestellt. Damit besitzt er ein geringeres Gewicht bei hoher Steifigkeit. Die dynamischen Eigenschaften der Maschine sollen so verbessert werden.

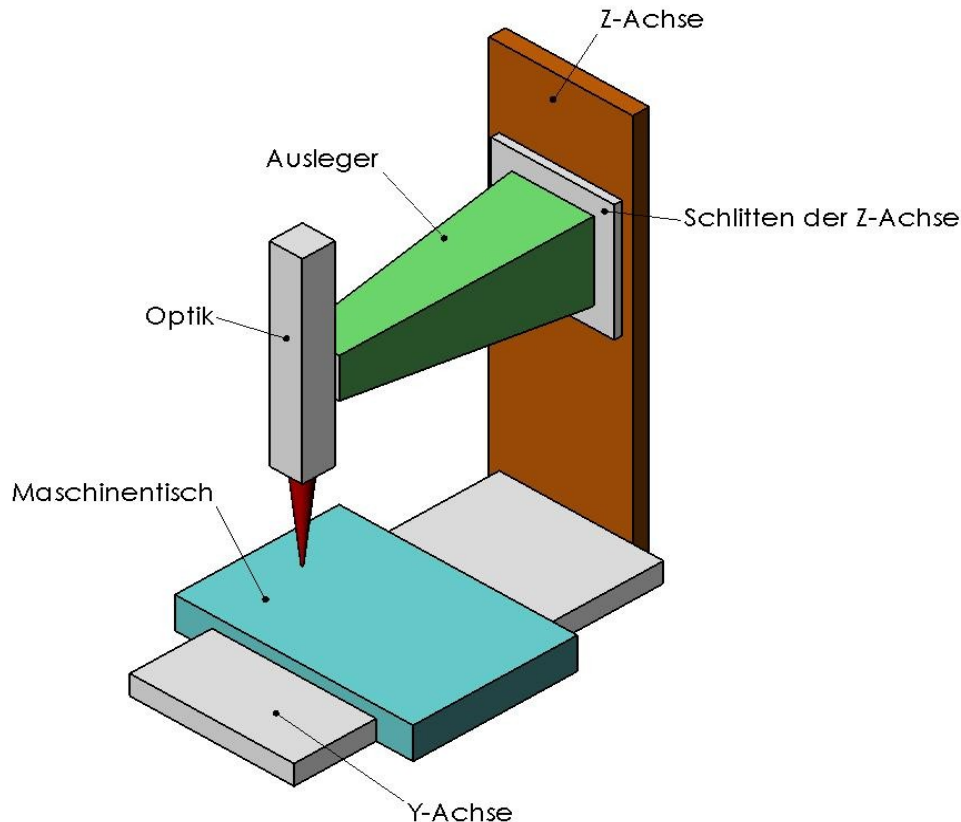


Abbildung 20: Bewegungssystem Vormer 2

7.2 Vorgenommene Messungen

Für die Messung am Vormer 2 werden die Beschleunigungssensoren verschieden angeordnet, um Schwingungen den entsprechenden Komponenten des Bewegungssystems zuzuordnen. Somit soll der Ausleger in zwei Richtungen vermessen werden. Dazu wird der Referenzsensor auf den in Z- Richtung verfahrbaren Schlitten gebracht, auf welchem der Ausleger befestigt ist. Gleichzeitig nimmt der direkt an der Optik befindliche Sensor Beschleunigungswerte auf. Die X- und Z- Bewegungen der Maschine bewirken eine unmittelbare Bewegungsänderung auf beide Sensoren. Die Y- Bewegung der Maschine wird vernachlässigt, da diese keinen direkten Einfluss auf den Ausleger besitzt. Der Messsensor wird nun auf den verfahrbaren Maschinentisch befestigt. Der Referenzsensor verbleibt dagegen am Schlitten der Z- Achse des Bewegungssystems. Die Maschine wird nun hintereinander in alle drei Richtungen verfahren. Während der X- und Z- Bewegung erhält der Referenzsensor die direkten Beschleunigungen. Schwingungen, die auf den Maschinentisch übertragen werden, misst der Messsensor. Wird in Y- Richtung verfahren, nimmt der Messsensor unmittelbare Beschleunigungswerte auf. Der „unbewegte“ Referenzsensor erfasst die vom Maschinentisch erzeugten, und auf das restliche Bewegungssystem übertragenen Vibrationen. Für die letzte Messanordnung wird der Referenzsensor an die Optik geschraubt. Der Messsensor verbleibt am Maschinentisch. Es werden wieder in allen drei Richtungen Messungen aufgenommen. Während der gesamten Messung wird mit einer Beschleunigung von $2,45\text{m/s}^2$ in alle Koordinatenrichtungen verfahren. Diese Beschleunigung ist in der Maschine voreingestellt.

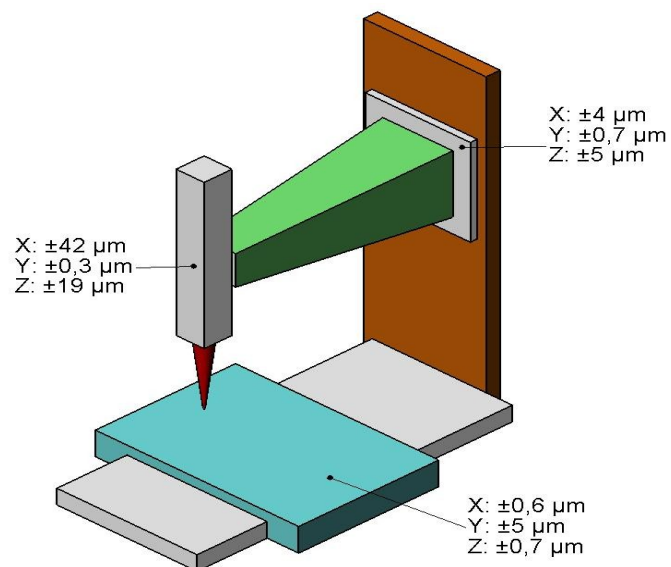


Abbildung 21: gemessene Schwingamplituden im Bewegungssystem

7.3 Ergebnisse

X- Richtung

Die erfassten Messwerte werden nach dem schon benannten Schema in Calc ausgewertet. Wonach festzustellen ist, dass die Schwingungen des Auslegers auf die Bearbeitungsoptik den größten Einfluss für den Fertigungsprozess haben. Dabei treten die größten Schwingamplituden mit $\pm 44 \mu\text{m}$ während der Bewegung in X- Richtung des Maschinenkoordinatensystems an der Optik auf. In Z- Richtung stellt sich dagegen eine maximale Auslenkung von $\pm 19 \mu\text{m}$ ein. Der Maschinentisch schwingt im Vergleich dazu während seiner Bewegung in Y am wenigsten mit $\pm 5 \mu\text{m}$. Die Schwingamplitude steht immer in Abhängigkeit mit der Steifigkeit, den bewegten Massen und der erfahrenen Beschleunigung eines Systems. Da die Beschleunigung des Vormer 2 in X- und Z- Richtung als konstant und gleich groß betrachtet werden kann, muss der Unterschied des Schwingzustands auf die Steifigkeitseigenschaften bzw. auf Massenänderungen zurückzuführen sein. Im Gegensatz zur Z- Bewegung muss bei der Translation in X die Z- Achse der Maschine mitverfahren werden. Dies führt zu einem Anstieg der bewegten Massen, was eine Erhöhung des Massenträgheitsmoments bedeutet. Die jeweils vier Linearführungen der Z- Achse und die des Auslegers an der Z- Achse müssen eine höhere Belastung ertragen. Aufgrund dessen federn diese stärker ein als bei der Z- Bewegung des Systems. Da auch die Grundplatte der Z- Achse, die Profilschienen und weitere Komponenten eine gewisse Nachgiebigkeit besitzen, ergibt sich ein gemessener Verkipppweg am Referenzsensor von $\pm 4,7 \mu\text{m}$ in Y- Richtung (Tab. 12). Dieser Wert wird aus den Daten der Y- Beschleunigungen nach vorangegangenen Ablauf ermittelt. Über die Länge des Auslegers verstärkt sich diese Auslenkung dann. Einen weiteren Einfluss von $\pm 4 \mu\text{m}$ auf die Gesamtauslenkung, gemessen am Referenzsensor in X, hat die Spindel, welche durch die Belastung elastisch gestaucht und gedehnt wird. Aber auch das Spiel zwischen Spindel und Spindelführung wirkt darauf ein. Eine weitere Teilauslenkung verursacht der Auslegerarm an sich. Obwohl dieser in einer Steckschweißkonstruktion gebaut ist, besitzt auch er eine elastische Verformung. Nichtsdestotrotz ist er im Hinblick auf Schwingungsminimierung gebaut. Eine hohe Steifigkeit bei geringer Masse zeichnen diese Steckschweißkonstruktion aus. Einen großen Einfluss auf den Schwingungszustand

besitzt die Kupplung zwischen Auslegerarm und Anschlussplatte für die Optik. Sie lenkt bei Krafteinwirkung um einen gewissen Betrag aus und verstärkt den Schwingzustand. In Summe dieser Teilauslenkung ergibt sich eine Gesamtauslenkung von $\pm 42 \mu\text{m}$.

Y- Richtung

Für die Y- Bewegung der Maschine wird der Maschinentisch entsprechend verfahren. Dessen Maximalauslenkung von $\pm 5 \mu\text{m}$ ergibt sich aus den Einfederungen der Führungswagen, sowie der Nachgiebigkeit des Spindelantriebs. Das Trägheitsmoment des Maschinentischs wird dabei hauptsächlich durch die Massen des Tisches und die des Spannfutters erzeugt. Es kommt zu einer Verkipfung in Z- Richtung des Maschinentischs von $\pm 1,1 \mu\text{m}$ (Tab. 12) während des Beschleunigungs- bzw. des Bremsvorgangs.

Z- Richtung

Wird die Maschine in Z- Richtung verfahren, stellt sich mit $\pm 19 \mu\text{m}$ Auslenkung an der Optik ein niedrigerer Wert ein als während der X- Bewegung. Dabei liegt der Verkipfsweg am Referenzsensor bei $\pm 1,8 \mu\text{m}$ (Tab. 12). Grund dafür ist, dass die wirkende beschleunigte Masse geringer ist als bei der X- Bewegung, da die Z- Achse nicht mehr verfahren wird. Damit ist auch die Belastung auf die vier Kugellinearführungen geringer, welche daraufhin weniger einfedern. Über die Länge des Auslegers betrachtet, verstärkt sich der Verkipfsweg am Referenzsensor bis hin zur Optik. Weitere $\pm 5 \mu\text{m}$ in Z- Richtung, hervorgerufen vor allem durch das Spindelspiel, der Nachgiebigkeit der Lagereinheit, sowie Stauchung und Dehnung der Spindel, bewirken einen Anteil der Gesamtauslenkung. Auch der Auslegerarm und die Kupplung zur Optik hin, besitzen gewisse Nachgiebigkeiten und lenken somit aus. Dabei muss erwähnt werden, dass diese jedoch nicht mit den Werten in X- Richtung gleichzusetzen sind. Denn aufgrund der Geometrie und der Änderung der Lastangriffsrichtung ergeben sich andere Steifigkeitswerte und somit auch Auslenkungen. Schließlich ergibt sich eine Gesamtamplitude von $\pm 19 \mu\text{m}$, die gemessen wird.

Dateiname	S1_Ort	S2_Ort	S1_max.a [m/s ²]	S2_max.a [m/s ²]
Vormer_1x.csv	Optik	Schlitten Z-Achse	5,7/-3,73	1,06/-0,87
Vormer_1z.csv	Optik	Schlitten Z-Achse	2,8/-2,23	1,43/-1,76
Vormer_2x.csv	Schlitten Y-Achse	Schlitten Z-Achse	0,45/-0,32	1,09/-1,23
Vormer_2y.csv	Schlitten Y-Achse	Schlitten Z-Achse	1,95/-1,6	0,49/-0,38
Vormer_2z.csv	Schlitten Y-Achse	Schlitten Z-Achse	0,32/-0,26	1,21/-1,1
Vormer_3x.csv	Schlitten Y-Achse	Optik	0,58/-0,61	5,64/-4,74
Vormer_3y.csv	Schlitten Y-Achse	Optik	0,76/-0,82	0,38/-0,52
Vormer_3z.csv	Schlitten Y-Achse	Optik	0,71/-0,38	2,86/-2,27

Tabelle 9: max. Beschleunigungen der einzelnen Messungen am Vormer 2

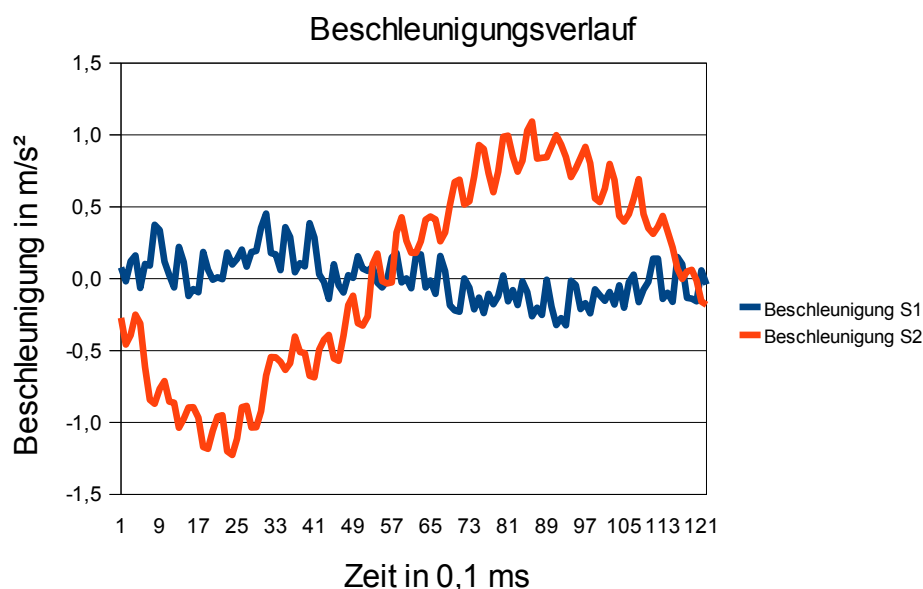


Abbildung 22: Beschleunigungsverlauf der 1. Schwingung im Umkehrpunkt aus der Datei Vormer_2x.csv

Dateiname	S1_Ort	S2_Ort	S1_max.v [mm/s]	S2_max.v [mm/s]
Vormer_1x.csv	Optik	Schlitten Z-Achse	12,05/-15,53	0,8/-1,92
Vormer_1z.csv	Optik	Schlitten Z-Achse	7,23/-6,63	1,75/-2,52
Vormer_2x.csv	Schlitten Y-Achse	Schlitten Z-Achse	0,31/-0,3	1,89/-1,74
Vormer_2y.csv	Schlitten Y-Achse	Schlitten Z-Achse	2,4/-2,45	0,37/-0,34
Vormer_2z.csv	Schlitten Y-Achse	Schlitten Z-Achse	0,3/-0,2	2,13/-2,64
Vormer_3x.csv	Schlitten Y-Achse	Optik	0,64/-0,9	16,25/-11,55
Vormer_3y.csv	Schlitten Y-Achse	Optik	1,34/-1	0,19/-0,24
Vormer_3z.csv	Schlitten Y-Achse	Optik	0,31/-0,28	6,57/-6,73

Tabelle 10: max. Geschwindigkeiten der einzelnen Messungen am Vormer 2

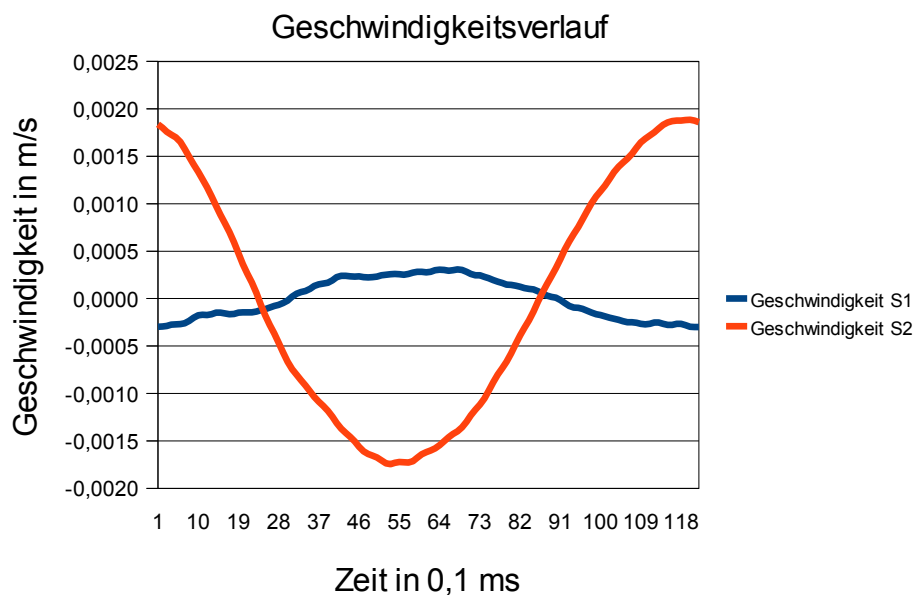


Abbildung 23: Geschwindigkeitsverlauf der 1.Schwingung im Umkehrpunkt aus der Datei Vormer_2x.csv

Dateiname	S1_Ort	S2_Ort	S1_max.s [μm]	S2_max.s [μm]
Vormer_1x.csv	Optik	Schlitten Z-Achse	42/-42	4/-4
Vormer_1z.csv	Optik	Schlitten Z-Achse	19/-19	5/-5
Vormer_2x.csv	Schlitten Y-Achse	Schlitten Z-Achse	0,6/-0,6	3,5/-3,5
Vormer_2y.csv	Schlitten Y-Achse	Schlitten Z-Achse	5/-5	0,7/-0,7
Vormer_2z.csv	Schlitten Y-Achse	Schlitten Z-Achse	0,7/-0,7	6/-6
Vormer_3x.csv	Schlitten Y-Achse	Optik	0,7/0,7	43/-43
Vormer_3y.csv	Schlitten Y-Achse	Optik	4,5/-4,5	0,3/-0,3
Vormer_3z.csv	Schlitten Y-Achse	Optik	0,7/-0,7	20/-20

Tabelle 11: max. Amplituden der einzelnen Messungen am Vormer 2

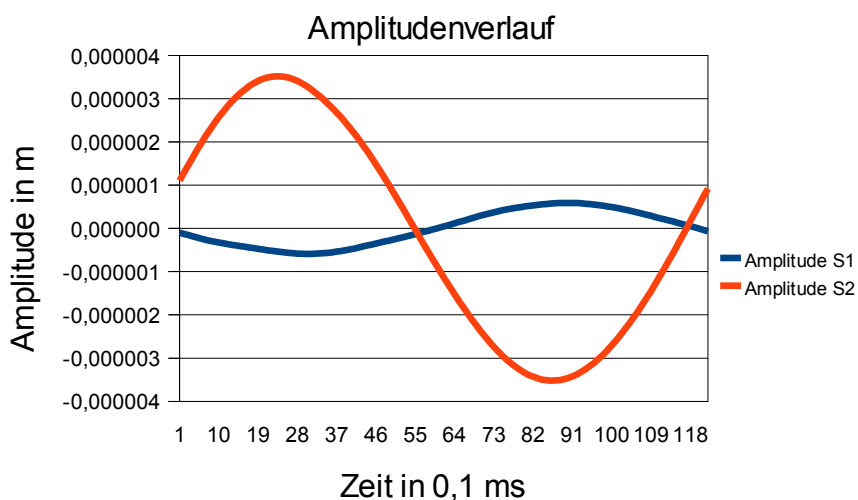


Abbildung 24: Amplitudenverlauf der 1.Schwingung im Umkehrpunkt aus der Datei Vormer_2x.csv

Auf den Schlitten der Z- Achse wirken während der X- Bewegung stärkere Schwingungen ein, als auf den Schlitten der Y- Achse. Die Beschleunigungen (Abb. 22) sind dementsprechend am Schlitten der Z- Achse größer. Aber auch die Geschwindigkeiten (Abb. 23) und Amplituden (Abb. 24) sind höher als am Schlitten der Y- Achse. Die auf den Maschinentisch, also den Schlitten der Y- Achse, einwirkenden Schwingzustände sind eingeleitete Vibrationen. Sie werden über das Maschinenbett von bewegten Komponenten her übertragen. Die Periodendauer einer Schwingung beträgt 12 Millisekunden.

7.4 Rechnerische Ermittlung der Schwingamplitude

7.4.1 Nachgiebigkeit der Spindel

Durch die beschleunigten Massen erfährt die Spindel eine Krafteinleitung in axialer Richtung. In der Spindel entstehen Zug- und Druckkräfte, die zu einer Verlängerung oder Verkürzung der elastisch beanspruchten Spindel führen. Diese wechselnden Längenunterschiede besitzen einen Anteil am Schwingzustand.

max. Nachgiebigkeit Spindel X- Achse

$$E = \sigma / \epsilon \quad (\text{FuT-MB 4.1 Quelle: /4/}) \quad (7.1)$$

$$\sigma = F / A = 4 * a * m / (\pi * d^2) \quad (\text{FuT-MB 9.1 Quelle: /4/}) \quad (7.2)$$

$$\epsilon = \Delta l / l_0 \quad (\text{FuT-MB 9.1 Quelle: /4/}) \quad (7.3)$$

$$\Delta l_x = 4 * m_x * a * l_0 / (\pi * d^2 * E) \quad (7.4)$$

$$m_x = 100 \text{ kg} \quad (\text{geschätzt})$$

$$a = 2,45 \text{ m/s}^2 \quad (\text{in Maschine voreingestellt})$$

$$l_0 = 1500 \text{ mm} \quad (\text{gemessen})$$

$$d = 36,5 \text{ mm} \quad (\text{gemessen})$$

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{FuT-MB 9.5 Quelle: /4/})$$

$$\underline{\Delta l_x = 1,7 \mu \text{ m}}$$

max. Nachgiebigkeit Spindel Y- Achse

$$\Delta l_y = 4 * m_y * a * l_0 / (\pi * d^2 * E) \quad (7.5)$$

$$m_y = 150 \text{ kg} \quad (\text{geschätzt})$$

$$a = 2,45 \text{ m/s}^2 \quad (\text{in Maschine voreingestellt})$$

$$l_0 = 960 \text{ mm} \quad (\text{gemessen})$$

$$d = 29 \text{ mm} \quad (\text{gemessen})$$

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{FuT-MB 9.5 Quelle: /4/})$$

$$\underline{\Delta l_y = 2,5 \mu \text{ m}}$$

max. Nachgiebigkeit Spindel Z- Achse

$$\Delta l_z = 4 * m_z * a * l_0 / (\pi * d^2 * E) \quad (7.6)$$

$$m_z = 40 \text{ kg} \quad (\text{geschätzt})$$

$$a = 2,45 \text{ m/s}^2 \quad (\text{in Maschine voreingestellt})$$

$$l_0 = 1100 \text{ mm} \quad (\text{gemessen})$$

$$d = 29 \text{ mm} \quad (\text{gemessen})$$

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{FuT-MB 9.5 Quelle:/4/})$$

$$\Delta l_z = 0,8 \mu \text{ m}$$

7.4.2 Nachgiebigkeit der Lagereinheit

Während das Bewegungssystem beschleunigt oder abbremst, wirken Trägheitskräfte den Beschleunigungskräften mit gleichem Betrag entgegen. Diese Kräfte werden über die Spindel auf die Festlagereinheit axial übertragen. Die Beanspruchung führt zu einem elastischen Auslenken des Lagers und somit zu einer Verstärkung des Schwingzustandes.

max. Nachgiebigkeit Lagereinheit X- Achse

$$F = c * q \quad (\text{FuT-MB 10.3.1 Quelle:/4/}) \quad (7.7)$$

$$q_x = F_{xI} / c_{BK30} \quad (7.8)$$

$$F_{xI} = m_x * a$$

$$m_x = 100 \text{ kg} \quad (\text{geschätzt})$$

$$a = 2,45 \text{ m/s}^2 \quad (\text{in Maschine voreingestellt})$$

$$F_{xI} = 245 \text{ N}$$

$$c_{BK30} = 195 \text{ N/}\mu\text{m} \quad (\text{aus Datenblatt Anlage 2})$$

$$q_x = 1,3 \mu \text{ m}$$

max. Nachgiebigkeit Lagereinheit Y- Achse

$$q_y = F_y / c_{BK20} \quad (7.9)$$

$$F_y = m_y \cdot a$$

$$m_y = 150 \text{ kg} \quad (\text{geschätzt})$$

$$a = 2,45 \text{ m/s}^2 \quad (\text{in Maschine voreingestellt})$$

$$F_y = 368 \text{ N}$$

$$c_{BK20} = 140 \text{ N/}\mu\text{m} \quad (\text{Datenblatt Lagereinheit Anlage 2})$$

$$q_y = 2,6 \mu\text{m}$$

max. Nachgiebigkeit Lagereinheit Z- Achse

$$q_z = F_z / c_{BK20} \quad (7.10)$$

$$F_z = m_z \cdot a$$

$$m_z = 40 \text{ kg} \quad (\text{geschätzt})$$

$$a = 2,45 \text{ m/s}^2 \quad (\text{in Maschine voreingestellt})$$

$$F_z = 98 \text{ N}$$

$$c_{BK20} = 140 \text{ N/}\mu\text{m} \quad (\text{Datenblatt Lagereinheit Anlage 2})$$

$$q_z = 0,7 \mu\text{m}$$

	errechnete Auslenkung durch Linearführung in Achsrichtung	gemessene Auslenkung in der Nähe der Linearführung in Achsrichtung
X- Achse	$\pm(1,7 \mu\text{m} + 1,3 \mu\text{m}) = \pm 3 \mu\text{m}$	$\pm 4 \mu\text{m}$
Y- Achse	$\pm(2,5 \mu\text{m} + 2,6 \mu\text{m}) = \pm 5,1 \mu\text{m}$	$\pm 5 \mu\text{m}$
Z- Achse	$\pm(0,8 \mu\text{m} + 0,7 \mu\text{m}) = \pm 1,5 \mu\text{m}$	$\pm 5 \mu\text{m}$

Tabelle 12: Gegenüberstellung errechneter und gemessener Auslenkungen an den Linearführungen

Die errechneten und gemessenen Auslenkungen (Tab. 12) der X- und Y- Achse stimmen nahezu überein. Die Werte der Z- Richtung weisen dagegen eine deutliche Differenz auf. Dieser Unterschied kann in der Nachgiebigkeit weiterer Komponenten liegen, die in der Berechnung aufgrund der Komplexität des Systems nicht erkannt werden.

7.4.3 Maximale Einfederung

Zur Berechnung der Einfederung wird der Ausleger als Balken vereinfacht angenommen (Abb. 25). Weiter wird angenommen, dass sich der Balken in seiner Mittellinie um den Punkt C dreht. Der Schwerpunkt wird auf die Mittellinie mit einem Abstand von $2/3$ der Balkenlänge festgelegt. Alle Linearführungen sind leicht vorgespannt. In den Diagrammen (Anlage 3+4) sind deshalb die entsprechenden Werte der Linie „Radial-C1“ zu entnehmen.

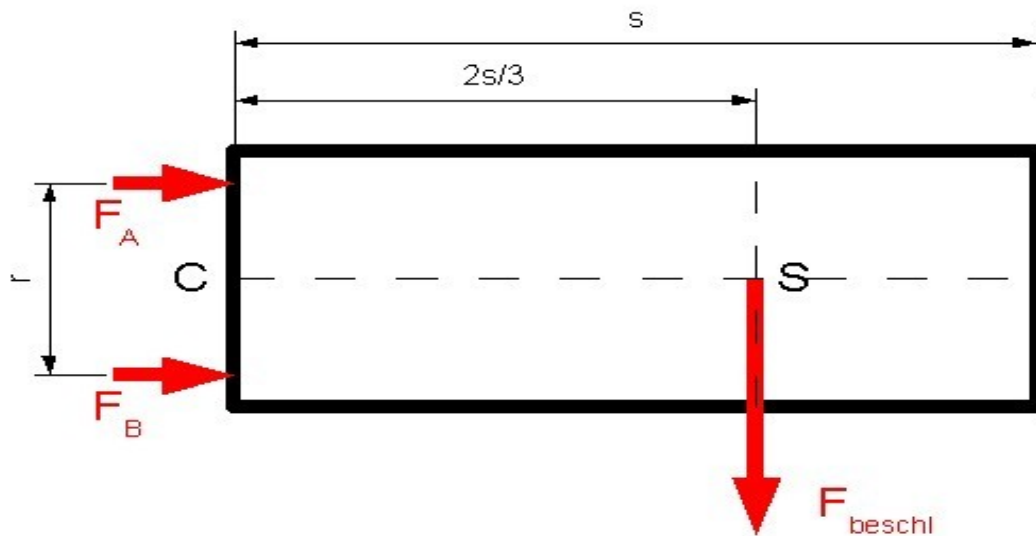


Abbildung 25: Kräfte am idealisierten Ausleger

Kräftegleichgewicht:

$$\sum F_x: F_A = -F_B$$

$$\sum M_C: F_A \cdot r/2 + 2 \cdot s \cdot F_{\text{beschl}}/3 - F_B \cdot r/2 = 0$$

$$|F_A| = F_{\text{beschl}} \cdot 2 \cdot s/3 \cdot r$$

(für 2 Führungswagen)

$$|F_A| = F_{\text{beschl}} \cdot s/3 \cdot r$$

(für 1 Führungswagen)

max. Einfederung während der X- Bewegung

$$F_{x1} = m_x * a = F_{\text{beschl}} \quad (7.11)$$

$$m_x = 100 \text{ kg} \quad (\text{geschätzt})$$

$$a = 2,45 \text{ m/s}^2 \quad (\text{in Maschine voreingestellt})$$

$$F_{x1} = 245 \text{ N}$$

$$F_{Ax1} = F_{x1} * s_{x1} / 3 * r_{x1} \quad (7.12)$$

$$r_{x1} = 202 \text{ mm} \quad (\text{gemessen})$$

$$s_{x1} = 843 \text{ mm} \quad (\text{gemessen})$$

$$F_{Ax1} = 341 \text{ N}$$

$$\delta_{x1} = 0,9 \mu \text{ m} \quad (\text{Diagramm Anlage 4})$$

$$F_{x2} = m_z * a = F_z \quad (7.13)$$

$$m_z = 40 \text{ kg} \quad (\text{geschätzt})$$

$$a = 2,45 \text{ m/s}^2 \quad (\text{in Maschine voreingestellt})$$

$$F_{x2} = 98 \text{ N}$$

$$F_{Ax2} = F_{x2} * s_{x2} / 3 * r_{x2} \quad (7.14)$$

$$r_{x2} = 217 \text{ mm} \quad (\text{gemessen})$$

$$s_{x2} = 751 \text{ mm} \quad (\text{gemessen})$$

$$F_{Ax2} = 113 \text{ N}$$

$$\delta_{x2} = 0,4 \mu \text{ m} \quad (\text{Diagramm Anlage 3})$$

$$\delta_x = \delta_{x1} + \delta_{x2} = 1,3 \mu \text{ m} \quad (7.15)$$

max. Einfederung während der Y- Bewegung

$$F_y = m_y * a \quad (7.16)$$

$$m_y = 150 \text{ kg} \quad (\text{geschätzt})$$

$$a = 2,45 \text{ m/s}^2 \quad (\text{in Maschine voreingestellt})$$

$$F_y = 368 \text{ N}$$

$$F_{Ay} = F_y * s_y / 3 * r_y \quad (7.17)$$

$$r_y = 386 \text{ mm} \quad (\text{gemessen})$$

$$s_y = 350 \text{ mm} \quad (\text{gemessen})$$

$$F_{Ay} = 111 \text{ N}$$

$$\delta_y = 0,3 \mu \text{ m} \quad (\text{Diagramm Anlage 4})$$

max. Einfederung während der Z- Bewegung

$$F_z = m_z * a \quad (7.18)$$

$$m_z = 40 \text{ kg} \quad (\text{geschätzt})$$

$$a = 2,45 \text{ m/s}^2 \quad (\text{in Maschine voreingestellt})$$

$$F_z = 98 \text{ N}$$

$$F_{Az} = F_z * s_z / 3 * r_z \quad (7.19)$$

$$r_z = 202 \text{ mm} \quad (\text{gemessen})$$

$$s_z = 751 \text{ mm} \quad (\text{gemessen})$$

$$F_{Az} = 121 \text{ N}$$

$$\delta_z = 0,4 \mu \text{ m} \quad (\text{Diagramm Anlage 3})$$

7.4.4 Verkipfweg direkt an den Linearführungselementen

Da die Sensoren einen bestimmte Abstand ($d-r/2$) zu den Linearführungen haben, geben diese nicht den exakten Verkipfweg u an den Führungswagen wieder, welcher mit der radialen Einfederung gleich zu setzen ist. Mittels Strahlensatz lässt sich dieser jedoch aus dem Verkipfweg x am Referenzsensor berechnen (Abb. 26).

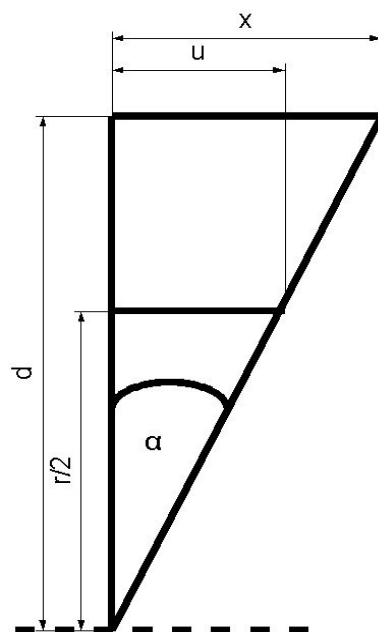


Abbildung 26: Ermittlung Verkipfweg an der Linearführung mittels Strahlensatz

	Verkipfung Schlitten der X- Achse in Y- Richtung während X- Bewegung (x_1)	Verkipfung Schlitten der X- Achse in Y- Richtung während Z- Bewegung (z_1)	Verkipfung Maschinentisch in Z- Richtung während Y- Bewegung (y_1)
X- Achse	$\pm 4,7 \mu m$		
Z- Achse		$\pm 1,8 \mu m$	
Y- Achse			$\pm 1,1 \mu m$

Tabelle 13: gemessene Verkipfung der Achsen in Abhängigkeit der Bewegungsrichtung

X- Achse

$$u_x / (r_x / 2) = x_1 / d_x \quad (7.20)$$

$$u_x = r_x * x_1 / (2 * d_x) \quad (7.21)$$

$$r_x = 217 \text{ mm} \quad (\text{gemessen})$$

$$x_1 = 4,7 \mu m \quad (\text{gemessen})$$

$$d_x = 173 \text{ mm} \quad (\text{gemessen})$$

$$\underline{u_x = 2,9 \mu m}$$

Y- Achse

$$\underline{y_1 = 1,1 \mu m = u_y}$$

Ist gleichzusetzen, da der Sensor in Höhe des Linearführungswagens angebracht ist.

Somit entspricht d_y gleich $r_y/2$.

Z- Achse

$$u_z = r_z * z_1 / (2 * d_z) \quad (7.22)$$

$$r_z = 202 \text{ mm} \quad (\text{gemessen})$$

$$z_1 = 1,8 \mu m \quad (\text{gemessen})$$

$$d_z = 195 \text{ mm} \quad (\text{gemessen})$$

$$\underline{u_z = 0,9 \mu m}$$

	Einfederung berechnet ($\delta_{x,y,z}$)	Einfederung gemessen ($u_{x,y,z}$)
X- Achse	$\pm 1,3 \mu\text{m}$	$\pm 2,9 \mu\text{m}$
Y- Achse	$\pm 0,3 \mu\text{m}$	$\pm 1,1 \mu\text{m}$
Z- Achse	$\pm 0,4 \mu\text{m}$	$\pm 0,9 \mu\text{m}$

Tabelle 14: Gegenüberstellung errechneter und gemessenen Einfederungen der jeweiligen Achse

Die Werte (Tab. 14) der errechneten Einfederungen geben nur einen Bruchteil von der praktisch gemessenen Einfederung wieder. Die Abweichungen begründen sich in weiteren Komponenten der Maschine, die einfedern. Aufgrund der Komplexität des Bewegungssystems werden sie jedoch nicht erkannt und können in der Rechnung nicht erfasst werden. Als ein solches Element sind beispielsweise die Platten zu benennen, an denen die Führungsschienen befestigt sind. Denn auch sie besitzen eine begrenzte Steifigkeit und verformen sich damit unter Krafteinwirkung elastisch. Aus der Vielzahl von Bauteilen ergibt sich dann in Summe die restliche Amplitudendifferenz. Natürlich ist auch zu beachten, dass bei der Berechnung Abschätzungen und Annahmen zur Vereinfachung getroffen werden, welche nicht exakt der Realität entsprechen. Als weitere Ursache der Differenz muss das Messsystem erwähnt werden, welche in der Realität auch nicht hundertprozentig fehlerfrei Beschleunigungswerte erfassen kann. Jedoch sollten die in der Praxis gemessenen Ergebnisse den wahren Schwingzustand genauer abbilden können als die errechneten Ergebnisse. Außerdem ist der Zeitaufwand für die experimentelle Schwingungsmessung geringer als eine rein mathematische Betrachtung, womit die experimentelle Schwingungsmessung vorzuziehen ist.

7.4.5 Einfluss der Verkipfung

Es wird die Annahme getroffen, dass der Ausleger als unendlich steifer Balken angesehen wird und der Drehpunkt zu allen Lagereinheiten den gleichen Abstand besitzt.

Beschleunigt oder verringert die Maschine ihre Verfahrensgeschwindigkeit, verkippt der Ausleger aufgrund seiner Trägheit (Abb. 27). Wobei in Abhängigkeit der Verkipprichtung ein Lager gedehnt und das andere gestaucht wird. Der Verkippwinkel α lässt sich aufgrund der geometrischen Beziehungen zweimal wiederfinden. Anhand der Gegenkathete x_1 , welche der maximalen Auslenkung des Referenzsensors in Y- Richtung entspricht, lässt sich α berechnen. Die Ankathete $r_x/2$ entspricht dem Abstand des Referenzsensors zum Drehpunkt. Durch Gleichsetzen, unter Beachtung der Längenverhältnisse, lässt sich auf die maximale Auslenkung an der Optik x_2 schließen. Die Auslenkungen x_1, y_1, z_1 sind mit den entsprechenden berechneten Einfederungswerte $\delta_{x,y,z}$ der Tabelle 14 gleichzusetzen.

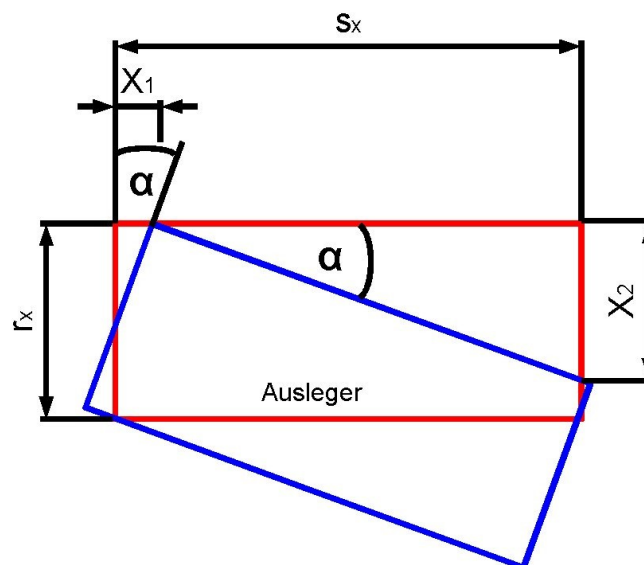


Abbildung 27: Verkipfung des idealen und unendlich steifen Auslegers

X- Achse

$$\tan \alpha = r_x / (2 * x_1) = s_x / x_2 \quad (7.23)$$

$$x_2 = 2 * s_x * x_1 / r_x \quad (7.24)$$

$$s_x = 843 \text{ mm} \quad (\text{gemessen})$$

$$x_1 = 1,3 \mu \text{ m} \quad (\text{errechnet})$$

$$r_x = 217 \text{ mm} \quad (\text{gemessen})$$

$$\underline{x_2 = 10,1 \mu \text{ m}}$$

Y- Achse

In Z- Richtung wird eine Einfederung von $\pm 0,3 \mu \text{ m}$ des Maschinentisch errechnet. Aufgrund des kurzen Hebelarms wirkt sich diese nur gering auf die Verkipfung aus und darf deshalb vernachlässigt werden.

Z- Achse

$$z_2 = 2 * s_z * z_1 / r_z \quad (7.25)$$

$$s_z = 751 \text{ mm} \quad (\text{gemessen})$$

$$z_1 = 0,4 \mu \text{ m} \quad (\text{errechnet})$$

$$r_z = 202 \text{ mm} \quad (\text{gemessen})$$

$$\underline{z_2 = 3 \mu \text{ m}}$$

7.4.6 Nachgiebigkeit des Auslegers

Der Ausleger lenkt während der X- und Z- Bewegung aufgrund seiner Nachgiebigkeit und den angreifenden Beschleunigungskräften aus. Diese Auslenkung, auch Verschiebung genannt, wird mittels des FEM-Solidworks-Tools berechnet und dargestellt.

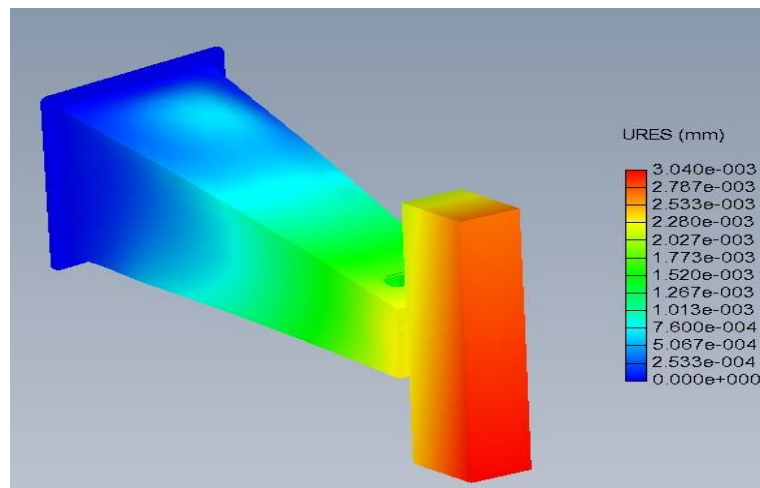


Abbildung 28: Verschiebung des Auslegers durch Krafteinwirkung in X-Richtung

Die Auslenkung am Ort des Optiksensors beträgt $\pm 3 \mu\text{m}$ während der X- Bewegung.

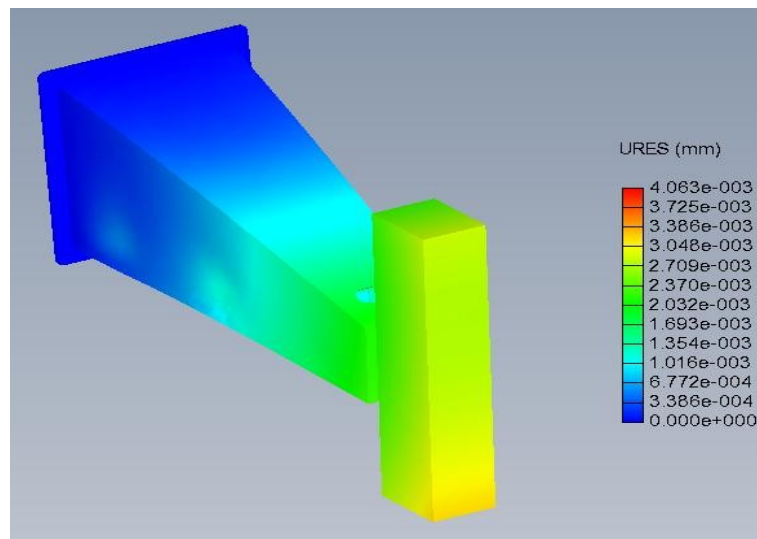


Abbildung 29: Verschiebung des Auslegers durch Krafteinwirkung in Z-Richtung

Die Auslenkung am Sitz des Optiksensors beträgt $\pm 2,5 \mu\text{m}$, während einer Beschleunigung der Maschine in Z- Richtung.

7.4.7 Auslenkung der Kupplung

Da die Kupplung zwischen Optik und Ausleger nicht vollkommen steif ist, lenkt sie bei Krafteinwirkung entsprechend aus. Um die Auslenkung zu ermitteln, wird eine weitere Messung durchgeführt. Dabei wird ein Sensor unmittelbar in der Nähe der Kupplung an den Ausleger befestigt. Der zweite Sensor wird in der Nähe des Kupplungsgegenstückes angebracht. Die Differenz zwischen beiden gemessenen Amplitudenwerten entspricht der radialen Verschiebung der Kupplung während der Bewegung. Das Bewegungssystem wird bei der Messung einzeln in X- und in Z- Richtung wie vorgegeben verfahren. Die ermittelten Amplitudenwerte beider Sensoren sind in Tabelle 15 eingetragen.

	Max. Amplitude S1 [μm]	Max. Amplitude S2 [μm]	Differenz [μm]
X- Bewegung	42/-42	27,6/-27,6	14,4
Z- Bewegung	20,7/-20,7	14,4/-14,4	6,3

Tabelle 15: gemessene Amplitudenwerte der Kupplung

Während der X- Bewegung lenkt die Kupplung bis auf $\pm 14,4 \mu\text{m}$ aus, wobei während der Z- Bewegung die Auslenkung mit $\pm 6,3 \mu\text{m}$ deutlich geringer ausfällt. Bei der Kupplung handelt es sich um eine Scheibenkupplung, die punktsymmetrisch aufgebaut ist. Die Abstände der Anschlussgewindebohrungen in X unterscheiden sich dabei von denen in Z- Richtung. Aus der Geometrie der Optik ergeben sich unterschiedliche Trägheitsmomente. Zudem ist der Abstand zwischen Drehachse und Massenschwerpunkt der Optikkomponenten während beider Bewegungen unterschiedlich. Dies führt laut „Steinerschen Satz“ zu einer weiteren Veränderung des Trägheitsmoments. Außerdem sind auch die Fertigungstoleranzen in X und Z der Kupplung in verschiedenen Größen vorhanden. All diese Faktoren tragen zu den unterschiedlichen Auslenkungswerten bei.

7.4.8 Anteilige Auslenkungen zur Gesamtamplitude

	X- Bewegung	Y- Bewegung	Z- Bewegung
Auslenkung durch Linearführung (berechnet)	$\pm 3 \mu\text{m}$	$\pm 5,1 \mu\text{m}$	$\pm 1,5 \mu\text{m}$
Einfluss durch Verkippen (berechnet)	$\pm 10,1 \mu\text{m}$	$\pm 0 \mu\text{m}$	$\pm 3 \mu\text{m}$
Auslenkung durch Auslegernachgiebigkeit (berechnet)	$\pm 3 \mu\text{m}$	$\pm 0 \mu\text{m}$	$\pm 2,5 \mu\text{m}$
Anteil der Kupplung (gemessen)	$\pm 14,4 \mu\text{m}$	$\pm 0 \mu\text{m}$	$\pm 6,3 \mu\text{m}$
Gesamtamplitude (errechnet)	$\pm 30,5 \mu\text{m}$	$\pm 5,1 \mu\text{m}$	$\pm 13,3 \mu\text{m}$
Gesamtamplitude (gemessen)	$\pm 42 \mu\text{m}$	$\pm 5 \mu\text{m}$	$\pm 19 \mu\text{m}$

Tabelle 16: Auflistung der anteiligen errechneten Auslenkungen zur Gesamtamplitude

In Tabelle 16 ist die errechnete Auslenkung der gemessenen Auslenkung gegenübergestellt, wobei deutliche Unterschiede in den Ergebnissen während der X- und Z- Bewegung festgestellt werden. Die Gesamtamplituden während der Y- Bewegung stimmen dagegen fast überein. Aufgrund der Komplexität des vorliegendem Bewegungssystems darf eher auf die Aussagefähigkeit der praktisch gemessenen Ergebnisse vertraut werden. Die vorangegangene Überprüfung des Messsystems mittels Schwingtest bestärkt diese Aussage. Der Unterschied zwischen den durch Rechnung erhaltenen Ergebnissen und den praktisch gemessenen Ergebnissen lässt sich also durch nicht erkannte Komponenten im System begründen, welche auf das Schwingverhalten Einfluss nehmen. Die Komplexität des Bewegungssystems verhindert dabei die eindeutige Erfassung aller Schwingungseinflüsse für die Rechnung. Zudem werden bei der rechnerischen Ermittlung Annahmen zur Vereinfachung getroffen, die von der Realität abweichen. Es ist also anzumerken, dass eine rechnerische Ermittlung von Schwingamplituden bei komplizierteren Systemen nur schwer möglich ist. Zudem ist der zeitliche und arbeitsmäßige Aufwand meist um ein Vielfaches höher als bei der experimentellen Schwingungsmessung. In einigen Fällen, wie beispielsweise bei der Kupplung, ist eine Messung nahezu unumgänglich, da diese eigens für den Vormer 2 konstruiert wurde, und somit keine Steifigkeitswerte für diese vorhanden sind. Durch die Messung kann jedoch der anteilige Einfluss der Kupplung auf die Schwingamplitude erfasst werden.

8 Vergleich der Maschinen

8.1 Gegenüberstellung der Maschinen

Im Laufe der Zeit und der hinzugewonnenen Erfahrungen ist es gelungen, die Maschinen aus schwingungstechnischer Sicht zu optimieren. Das größte Fehlerpotenzial im Hinblick auf Bahnabweichung durch Schwingungen bildet dabei die älteste Maschine LVM 700. Ihre frei hängende Y- und Z- Achse bilden das schwingungsfähigste System aller vermessenen Maschinen. Die LVM 316 schneidet im Bezug auf Schwingzustände schon wesentlich besser ab. Ihre Y- Achse hat einen steiferen Aufbau und ist gegengelagert durch eine Kugelführung. Diese Gegenführung wirkt stabilisierend. Zudem besitzt die Maschine eine kleinere Optik als die LVM 700, wodurch auch eine kleinere Masse beschleunigt wird. Die kürzeren Achslängen begründen sich in einem kleineren Arbeitsraum, wobei aber auch eine höhere Steifigkeit dadurch zu erwarten ist. Eine großen Anteil am Schwingverhalten haben die Winkel zur Optikbefestigung an den beiden Maschinen LVM 700 und LVM 316. Sie bewirken vor allem in Y- Richtung eine Schwingungsverstärkung. Die höchste Steifigkeit der Achsen weist der Vormer 2 aufgrund seiner Steckschweißkonstruktion des Auslegers auf. Das Verhältnis zwischen Steifigkeit des Auslegers und dessen Masse ist höher als bei beiden LVM-Maschinen. Augenscheinlich glaubt man, wenn man nur die Amplituden miteinander vergleicht, dass der Vormer 2 schwingungsempfindlicher ist als die LVM 316. Doch dafür ist zu beachten, dass der Vormer 2 über vierfach stärker beschleunigt, und auch die beschleunigten Massen größer sind. Der Vormer 2 ist damit die steifste und damit schwingungsärmste der drei Maschinen. Die LVM 700 bildet dagegen das schwingungsanfälligste System. Die große und damit massebehaftete Optik, sowie eine fehlende Gegenführung der Y- Achse sind für das Schwingverhalten förderlich. Da die LVM 700 mit fast 12 Jahren die Älteste der vorgestellten Maschinen ist, ist auch mit dem größten Verschleiß der Linearführungen zu rechnen. Abweichungen werden größer und der Schwingzustand des Bewegungssystems verstärkt sich. Zudem federn die Linearführungen ein, was eine Schwingungsverstärkung an dieser Maschine herbeiführt.

8.2 Möglichkeiten um Schwingungen zu dezimieren

Um Schwingungen im System zu dezimieren gibt es verschiedene Möglichkeiten. Eine einfache Möglichkeit bietet die Verringerung der voreingestellten Beschleunigung der Maschine. Die Bewegung wird sanfter vollführt und die Schwingungszustände sind schwächer. Jedoch bewirkt dies eine Verlängerung der Prozesszeit und damit höhere Kosten. Zugleich werden die Beschleunigungs- und Bremswege während der Bearbeitung länger. Damit verbunden ist eine sich ändernde Vorschubgeschwindigkeit. Eine gleichbleibende Qualität des Bearbeitungsbereiches eines Werkstücks wäre noch schwerer einzuhalten. Eine weitere Möglichkeit ist eine Pause in den Umkehrpunkten einzulegen, damit Schwingungszustände Zeit haben, abzuklingen. Jedoch verlängert sich somit wiederum die Bearbeitungszeit und die Kosten steigen. Um Schwingungen dauerhaft zu dezimieren, muss die Steifigkeit erhöht oder die beschleunigten Massen verkleinert werden. Für die Versteifung der Achsprofile könnten beispielsweise zusätzliche Verstärkungsrippen bzw. Winkel angebracht oder komplett neue Profiltypen eingesetzt werden. Bei langen freistehenden Achsen ist, wie bei der LVM 316 geschehen, auf eine Gegenführung zu achten. Sie verhindert das Verkippen, nimmt Kräfte auf und führt so zu einem schwingungsärmeren System. Bei den Führungswagen ist darauf zu achten, dass diese vorgespannt sind, um sie möglichst spielfrei zu halten. Die Einfederung wird somit reduziert. Zudem ist über eine Erhöhung der Anzahl von Führungen nachzudenken, da sich so die Kräfte auf den einzelnen Führungswagen verringern, was eine kleinere Einfederung zur Folge hat. Dementsprechend müsste sich auch der Verschleiß der Führungen verringern. Da an den beiden Maschinen LVM 700 und LVM 316 die Winkel zur Optikbefestigung eine Schwachstelle im Bezug auf Schwingung bedeuten, könnten diese stärker versteift werden. Dabei könnten beispielsweise die Verstrebung zwischen beiden Winkelschenkeln über einen längeren Bereich vollzogen werden. Zur Verringerung der Massen ist die Möglichkeit zum Einsatz einer leichteren Optikkomponente nicht auszuschließen. Wenn eine kleinere Optik eingesetzt wird, kann auch der Winkel zur Befestigung verkleinert werden. Aber auch der Einsatz von anderen Werkstoffen sollte beachtet werden. So konnte man beispielsweise eine Gewichtssparnis an der LVM 316 herbeiführen, indem der Optikbefestigungswinkel aus Aluminium neu gefertigt wurde, um den Stahlwinkel zu ersetzen. Ebenfalls positiv auf das Schwingverhalten wirkt sich der

Einsatz einer Steckschweißkonstruktion als Achse, wie am Vormer 2 geschehen, aus. Die hohe Steifigkeit bei geringerer Masse bewirkt ein gutes dynamisches Verhalten, welches bei ausreichender Genauigkeit auch höhere Prozessbeschleunigungen und -geschwindigkeiten zulässt. Um die Schwingungsübertragung auf die gesamte Maschine zu mindern, können mit Beton verfüllte Maschinenbetten eingesetzt werden. Der Beton im Innern der Ummantelung des Maschinenbetts besitzt eine hohe Steifigkeit und ein besseres Dämpfungsvermögen als Stahl. Schwingungen können also schneller abklingen. Ein solches Maschinenbett wird bereits im Vormer 2 der Firma Laservorm verwendet. Im Fall des Vormer 2 bildet die Kupplung zwischen Optik und Ausleger eine Schwachstelle im Bezug auf Schwingungen. Wenn es nötig sein sollte, dass die Schwingungen minimiert werden müssen, wäre der Einsatz einer steiferen Kupplung zu überdenken.

Jedoch ist immer zu beachten, dass eine Schwingungsminimierung nur soweit sinnvoll ist, bis die Prozessanforderungen erfüllt werden können. Weitere Maßnahmen zu Verringerung schlagen sich nur in Aufwand und Kosten nieder.

9 Zusammenfassung

Mit dieser Arbeit wird der Grundstein für zukünftige Schwingungsmessungen in der Firma Laservorm GmbH Altmittweida gelegt. Die Ergebnisse ermöglichen es, die aktuellen Maschinen zu bewerten, und neue Maschinen mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse im Hinblick auf ihr Schwingungsverhalten zu optimieren. Zugleich bietet diese Schwingungsmessmethode die Möglichkeit, zukünftigen Maschinen zu vermessen, um sie zu überprüfen. Dabei ist zu bekräftigen, dass die Schwingungen nur so klein gehalten werden müssen, wie der Prozess es verlangt. Denn jede weitere Maßnahme zur Reduzierung lässt die Kosten und den Aufwand steigen. Eine objektive Betrachtung des Schwingzustands ist durch die Schwingungsmessung möglich. So können Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und die für den Fertigungsprozess wichtigen Amplituden der Schwingzustände ermittelt werden. Die daraus gewonnenen Informationen können in der Entwicklung genutzt werden, um die Erkenntnisse bei neuen Maschinenprojekten mit einfließen zu lassen. Natürlich ist der Zeit- und Arbeitsaufwand für eine solche Schwingungsmessung nicht zu verachten. Jedoch ist dieser wesentlich geringer und genauer als beispielsweise bei einer vollkommen rechnerischen Schwingungsanalyse des Bewegungssystems. Für die weitere Entwicklung und den Fortschritt der Firma Laservorm kann dieses Werkzeug also nur von Vorteil sein. In Zukunft sollen die Messdaten noch schneller und einfacher für die Auswertung verarbeitet werden. Dazu wird derzeit ein Programm durch einen Mitarbeiter der Firma geschrieben. Mit diesem Programm sollen sich dann Beschleunigungs-, Geschwindigkeits- und Amplitudenwerte per Tastendruck ausgeben lassen. Zudem soll sich mithilfe der Fouriertransformation das Frequenzspektrum der Schwingungen im Programm wiedergeben lassen. Um erste Eindrücke und Erfahrungen zu erhalten, stand während meiner Bearbeitung des Themas eher die Auswertung im Hinblick auf Amplituden im Vordergrund, weshalb die Frequenzen außer Acht gelassen werden konnten.

10 Anlagen

Anlage 1: Auszug aus dem Datenblatt des Beschleunigungssensors MMA7260QT der Firma Freescale (Quelle /6/)

Table 2. Operating CharacteristicsUnless otherwise noted: $-40^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq 105^{\circ}\text{C}$, $2.2\text{ V} \leq V_{DD} \leq 3.6\text{ V}$, Acceleration = 0g, Loaded output⁽¹⁾

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Operating Range ⁽²⁾					
Supply Voltage ⁽³⁾	V_{DD}	2.2	3.3	3.6	V
Supply Current	I_{DD}	—	500	800	μA
Supply Current at Sleep Mode ⁽⁴⁾	I_{DD}	—	3.0	10	μA
Operating Temperature Range	T_A	-40	—	+105	$^{\circ}\text{C}$
Acceleration Range, X-Axis, Y-Axis, Z-Axis					
g-Select1 & 2: 00	g_{FS}	—	± 1.5	—	g
g-Select1 & 2: 10	g_{FS}	—	± 2.0	—	g
g-Select1 & 2: 01	g_{FS}	—	± 4.0	—	g
g-Select1 & 2: 11	g_{FS}	—	± 6.0	—	g
Output Signal					
Zero-g ($T_A = 25^{\circ}\text{C}$, $V_{DD} = 3.3\text{ V}$) ⁽⁵⁾	V_{OFF}	1.485	1.65	1.815	V
Zero-g ⁽⁶⁾	V_{OFF}, T_A				$\text{mg}/^{\circ}\text{C}$
X-axis		$\pm 2.6^{(6)}$	± 0.6	$\pm 3.8^{(7)}$	
Y-axis		$\pm 5.8^{(6)}$	± 5.8	$\pm 5.9^{(7)}$	
Z-axis		$\pm 1.0^{(6)}$	± 0.8	$\pm 0.8^{(7)}$	
Sensitivity ($T_A = 25^{\circ}\text{C}$, $V_{DD} = 3.3\text{ V}$)					
1.5g	$S_{1.5g}$	740	800	860	mV/g
2g	S_{2g}	555	600	645	mV/g
4g	S_{4g}	277.5	300	322.5	mV/g
6g	S_{6g}	185	200	215	mV/g
Sensitivity ⁽⁴⁾	S, T_A				$\%/^{\circ}\text{C}$
X-axis		$\pm 0.02^{(6)}$	± 0.02	$\pm 0.02^{(7)}$	
Y-axis		$\pm 0.01^{(6)}$	± 0.01	$\pm 0.01^{(7)}$	
Z-axis		$\pm 0.01^{(6)}$	± 0.00	$\pm 0.01^{(7)}$	
Bandwidth Response					
XY	f_{3dB}	—	350	—	Hz
Z	f_{3dB}	—	150	—	Hz
Noise					
RMS (0.1 Hz – 1 kHz) ⁽⁴⁾	n_{RMS}	—	4.7	—	mVrms
Power Spectral Density RMS (0.1 Hz – 1 kHz) ⁽⁴⁾	n_{PSD}	—	350	—	$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
Control Timing					
Power-Up Response Time ⁽⁸⁾	$t_{RESPONSE}$	—	1.0	2.0	ms
Enable Response Time ⁽⁹⁾	t_{ENABLE}	—	0.5	2.0	ms
Sensing Element Resonant Frequency					
XY	f_{GCELL}	—	6.0	—	kHz
Z	f_{GCELL}	—	3.4	—	kHz
Internal Sampling Frequency	f_{CLK}	—	11	—	kHz
Output Stage Performance					
Full-Scale Output Range ($I_{OUT} = 30\text{ }\mu\text{A}$)	V_{FSO}	$V_{SS}+0.25$	—	$V_{DD}-0.25$	V
Nonlinearity, X_{OUT} , Y_{OUT} , Z_{OUT}	NL_{OUT}	-1.0	—	+1.0	%FSO
Cross-Axis Sensitivity ⁽¹⁰⁾	$V_{XY, XZ, YZ}$	—	—	5.0	%
Ratiometric Error ⁽¹¹⁾	error	—	—	—	%

1. For a loaded output, the measurements are observed after an RC filter consisting of a 1.0 k Ω resistor and a 0.1 μF capacitor on V_{DD} -GND.

2. These limits define the range of operation for which the part will meet specification.

3. Within the supply range of 2.2 and 3.6 V, the device operates as a fully calibrated linear accelerometer. Beyond these supply limits the device may operate as a linear device but is not guaranteed to be in calibration.

4. This value is measured with g-Select in 1.5g mode.

5. The device can measure both + and - acceleration. With no input acceleration the output is at midsupply. For positive acceleration the output will increase above $V_{DD}/2$. For negative acceleration, the output will decrease below $V_{DD}/2$.

6. These values represent the 10th percentile, not the minimum.

7. These values represent the 90th percentile, not the maximum.

8. The response time between 10% of full scale V_{DD} input voltage and 90% of the final operating output voltage.

9. The response time between 10% of full scale Sleep Mode input voltage and 90% of the final operating output voltage.

10. A measure of the device's ability to reject an acceleration applied 90 from the true axis of sensitivity.

11. Zero-g offset ratiometric error can be typically >20% at $V_{DD} = 2.2\text{ V}$. Sensitivity ratiometric error can be typically >3% at $V_{DD} = 2.2$. Consult factory for additional information.

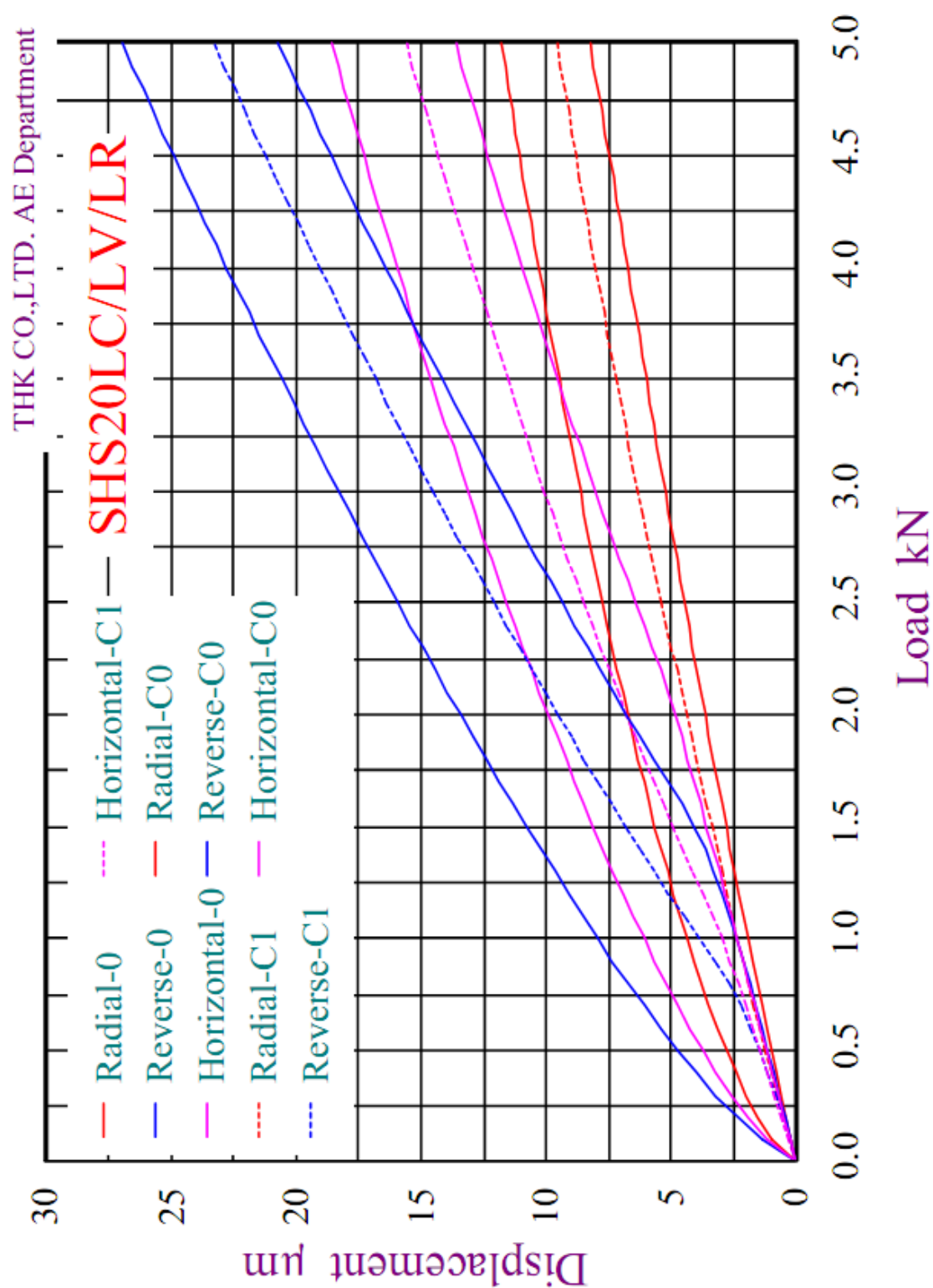
Anlage 2: Steifigkeitswerte der Festlagereinheiten BK20 und BK30 der Firma THK
(Quelle /7/)

Tragzahlen und Steifigkeitswerte der Lager

Festlagerseite Schrägkugellager					Loslagerseite Rillenkugellager			
Baugröße Lager- einheit	Baugröße Kugellager	Axialrichtung			Baugröße Lagereinheit	Baugröße Kugellager	Radialrichtung	
		Dynamische Tragzahl Ca (kN)	Hinweis) Statische Tragzahl (kN)	Steifigkeit (N/μm)			Dynamische Tragzahl C (kN)	Statische Tragzahl C ₀ (kN)
EK 4 FK 4	AC4-12P5	0,93	1,1	27	—	—	—	—
EK 5 FK 5	AC5-14P5	1	1,24	29	—	—	—	—
EK 6 FK 6	AC6-16P5	1,38	1,76	35	EF 6 FF 6	606ZZ	2,19	0,87
EK 8 FK 8	79M8DF GMP5	2,93	2,15	49	EF 8	606ZZ	2,19	0,87
EK 10 FK 10 BK 10	7000HTDF GMP5	6,08	3,1	65	EF 10 FF 10 BF 10	608ZZ	3,35	1,4
EK 12 FK 12 BK 12	7001HTDF GMP5	6,66	3,25	88	EF 12 FF 12 BF 12	6000ZZ	4,55	1,96
EK 15 FK 15 BK 15	7002HTDF GMP5	7,6	4	100	EF 15 FF 15 BF 15	6002ZZ	5,6	2,84
BK 17	7203HTDF GMP5	13,7	5,85	125	BF 17	6203ZZ	9,6	4,6
EK 20 FK 20	7204HTDF GMP5	17,9	9,5	170	EF 20 FF 20	6204ZZ	12,8	6,65
BK 20	7004HTDF GMP5	12,7	7,55	140	BF 20	6004ZZ	9,4	5,05
FK 25 BK 25	7205HTDF GMP5	20,2	11,5	190	FF 25 BF 25	6205ZZ	14	7,85
FK 30 BK 30	7206HTDF GMP5	28	16,3	195	FF 30 BF 30	6206ZZ	19,5	11,3
BK 35	7207HTDF GMP5	37,2	21,9	255	BF35	6207ZZ	25,7	15,3
BK 40	7208HTDF GMP5	44,1	27,1	270	BF 40	6208ZZ	29,1	17,8

Hinweis: "Statische Tragzahl" gibt die zulässige statische Belastung an.

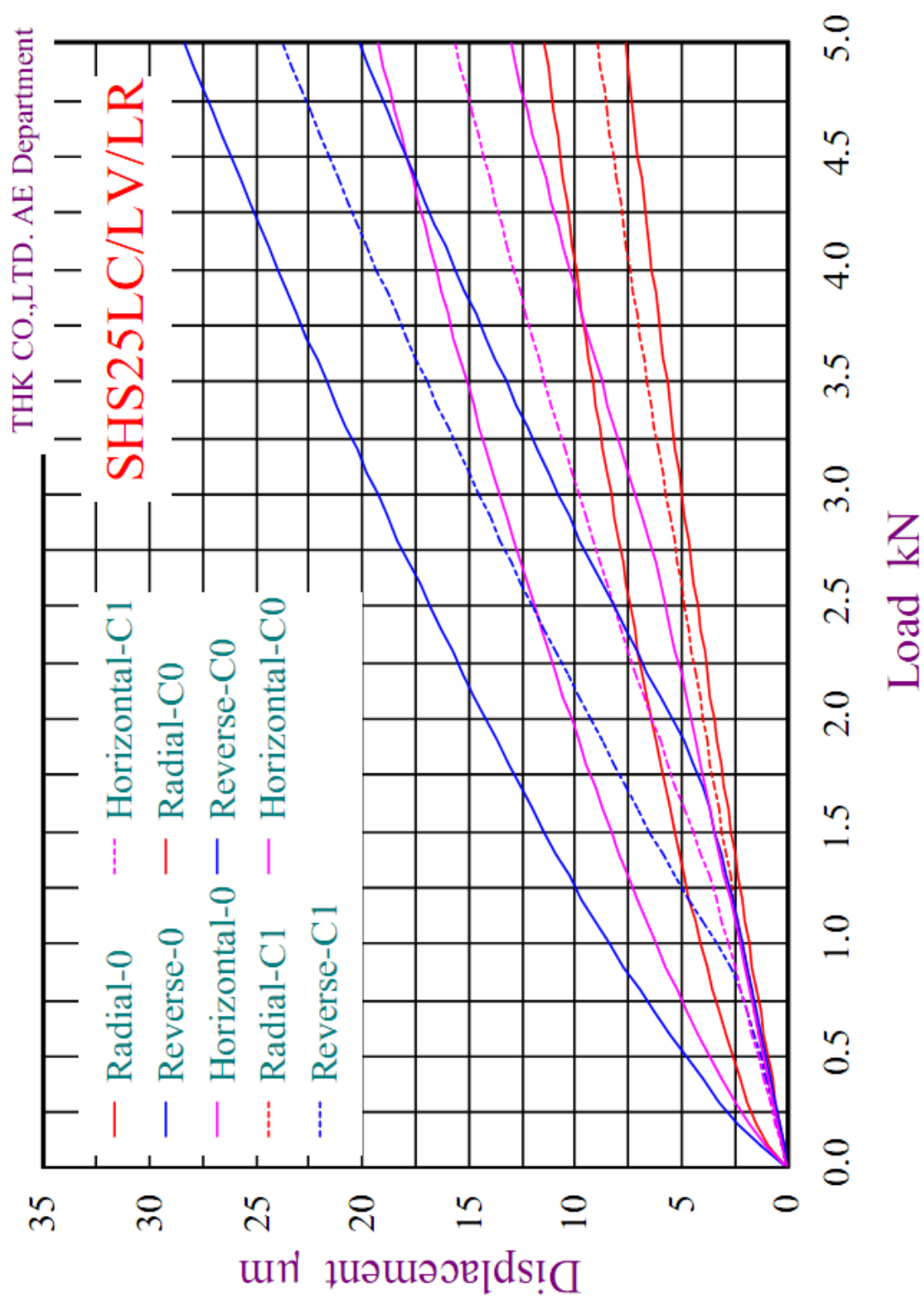
Anlage 3: Einfederungsdiagramme der Linearführungen mit Kugelschienen SHS20LV der Firma THK (Quelle /8/)



The Theoretical Rigidity Diagram

based on Hertz Theory and Deformation of LM Block side portion

Anlage 4: Einfederungsdiagramme der Linearführungen mit Kugelschienen SHS25LV der Firma THK (Quelle /9/)



The Theoretical Rigidity Diagram

based on Hertz Theory and Deformation of LM Block side portion

11 Quellenverzeichnis

- /1/ Metra Mess- und Frequenztechnik in Radebeul e.K.: Piezoelektrisches Prinzip,
URL:<<http://www.mmf.de/images/drawings/bild2.gif>>, verfügbar am 06.08.2010
- /2/ Pololu Robotics and Electronics Corporation: MMA7260QT 3-Axis Accelerometer,
URL:<<http://www.pololu.com/picture/0J675.300.jpg>>, verfügbar am 06.08.2010
- /3/ Chemgaroo: Kapazitive Beschleunigungssensoren,
URL:<http://www.chemgapedia.de/vsengine/media/vsc/de/ch/11/cmt/sensoren/beschleunigung/bilder/beschleunigung_3.gif>, verfügbar am 06.08.2010
- /4/ Böge, Alfred (Hrsg.): Formeln und Tabellen Maschinenbau.-1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2007
- /5/ Beitz, Wolfgang; Grote, Karl-Heinrich (Hrsg.): Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau.-20. Aufl. Berlin: Springer, 2001
- /6/ Freescale Semiconductor: Technical Data: MMA7260QT, 2008, S3
- /7/ THK: THK-Produktkatalog: Lagereinheiten, 2010, 15-156
- /8/ THK: THK-Produktkatalog: Linearführungen, 2010, 1-314
- /9/ THK: THK-Produktkatalog: Linearführungen, 2010, 1-315

12 Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Mittweida, 31.08.2010